ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ: ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

"Οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση συστημάτων αφαλάτωσης νερού με χρήση ανανεώσιμων και μη πηγών ενέργειας. Εναλλακτικές στρατηγικές στον ελληνικό νησιωτικό χώρο."

Ιωάννης Χρ. Καραγιάννης

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Πέτρος Σολδάτος. Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)
Γιώργος Παπαδάκης, Καθηγητής ΓΠΑ
Σταύρος Γιαννιώτης, Αναπλ. Καθηγητής ΓΠΑ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, Πέτρο Σολδάτο, για την πολύτιμη υποστήριξή σε όλα τα στάδια της διατριβής αλλά και την παρακίνηση και προθυμία για βοήθεια, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η εκπόνησή της διατριβής αλλά και η πραγματοποίηση της πλειονότητας των δημοσιεύσεων μου.

Επίσης ευχαριστώ τους καθηγητές της τριμελούς μου επιτροπής καθ. Γεώργιο Παπαδάκη και καθ. Σταύρο Γιαννιώτη για τα εποικοδομητικά τους σχόλια,

τον επ. καθηγητή Στέλιο Ροζάκη για την παρακίνηση και λύση αδιεξόδων, αλλά και την καταβολή κάθε δυνατής προσπάθειας για την αγορά του λογισμικού με το οποίο 'χτίστηκε' το περιβαλλοντικό κομμάτι της εργασίας,

τον καθηγητή Fausto Freire για την πολύτιμη συμβολή και καθοδήγηση στο περιβαλλοντικό κομμάτι της εργασίας,

τον λέκτορα Ανδρέα Δριχούτη για την ενθάρυνση και υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια,

τους Δρ. Δημήτρη Μανωλάκο, και Δρ. Essam Mohamed για την υπομονή και την ευγένεια στην επίλυση απορριών,

τις Γεωργία Παπαϊωάννου και Αφροδίτη Βαγιωνάκη για την συμπαράσταση και παρότρυνση.

Στους γονείς μου Χρήστο και Χρύσα και στην αδερφή μου Ανθή για την απεριόριστη αγάπη, υπομονή, κατανόηση, συμπαράσταση και ενθάρρυνση

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ 1
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 1
ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΑΣ .. 1
ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ: ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ 1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ . 2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΝΕΡΟΥ, ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ 8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ . 12
3.1 Εισαγωγή 12
3.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης 12
3.2.1 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (Multi Stage Flash Distillation) 13
3.2.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multi Effect Distillation) 13
3.2.3 Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor compression) 15
3.2.4 Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis) 16
3.2.5 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis) 18
3.2.6 Υβριδικές μέθοδοι 19
3.3 Μονάδες αφαλάτωσης στον κόσμο 21
3.4 Βιβλιογραφία 24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ 25
4.1 Εισαγωγή 25
4.2 Ηλιακή ενέργεια 26
4.3 Αιολική ενέργεια 27
4.4 Ο συνδυασμός της ηλιακής με την αιολική ενέργεια 27
4.5 Γεωθερμική ενέργεια 28
4.6 Άλλες χρησιμοποιούμενες ΑΠΕ 28
4.7 Συνδυασμοί αφαλάτωσης και ΑΠΕ 29
4.8 Βιβλιογραφία 32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟ ΧΩΡΟ: ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ 33
5.1 Εισαγωγή 33
5.2 Η έλλειψη νερού στα Ελληνικά νησιά 33
5.3 Μεταφορά νερού 36
5.4 Το κόστος της μεταφοράς νερού 38
5.5 Αφαλάτωση νερού 40
5.6 Το κόστος της αφαλάτωσης στην Ελλάδα 41
5.6.1 Εξέταση της περίπτωσης της Μήλου 41
5.7 Υπολογισμός κόστους αφαλάτωσης νερού 42

5.8 Συμπεράσματα 46
5.9 Βιβλιογραφία..... 47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ 48
6.1 Εισαγωγή 48
6.2 Κόστος αφαλάτωσης νερού με διαφορετικά επίπεδα αλατότητας 49
6.3 Κόστος αφαλάτωσης νερού και χρησιμοποιούμενη ενέργεια 53
6.4 Κόστος αφαλάτωσης νερού για διαφορετικές μεθόδους αφαλάτωσης 56
6.5 Κόστος αφαλάτωσης νερού και υβριδικά συστήματα..... 61
6.6 Συμπεράσματα 63
6.7 Βιβλιογραφία..... 64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟ ΧΩΡΟ 69
7.1 Εισαγωγή 69
7.2 Η μεθοδολογία της εκτίμησης κύκλου ζωής (LCA)..... 70
7.3 Η αφαλάτωση νερού σε Θηρασία και Μήλο 71
7.3.1 Το σύστημα της αφαλάτωσης για τη Θηρασία 72
7.3.2 Το σύστημα της αφαλάτωσης για τη Μήλο 73
7.4 LCA για τα συστήματα αφαλάτωσης..... 75
7.4.1 Προσδιορισμός του σκοπού και του πλαισίου..... 75
7.4.2 Καθορισμός του καταλόγου των υλικών 76
7.4.3 Εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης..... 79
7.4.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων 83
7.5 Συμπεράσματα 83
7.6 Βιβλιογραφία..... 85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 87
8.1 Εισαγωγή 87
8.2 Το περιβαλλοντικό πρόβλημα και η αφαλάτωση 88
8.3 Ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας..... 90
8.4 Μεθοδολογία για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του κόστους του CO_2 91
8.4.1 Αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης..... 94
8.4.2 Υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης 95
8.5 Εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με διαφορετικές πηγές ενέργειας 97
8.5.1 Εκπομπές από σταθμούς καύσης πετρελαίου..... 97
8.5.2 Εκπομπές από φωτοβολταϊκά συστήματα 98
8.5.3 Εκπομπές από ανεμογεννήτριες 98
8.5.4 Εκπομπές από σταθμούς καύσης άνθρακα 99
8.6 Οι εκπομπές CO_2 από μονάδες αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά 101
8.7 Το κόστος παγίδευσης και αποθήκευσης του CO_2 102
8.8 Υπολογισμός ελάχιστης τιμής του CO_2 για χρήση φωτοβολταϊκών... 104

8.9 Υπολογισμός ελάχιστης τιμής του CO_2 για χρήση ανεμογεννητριών 107
8.10 Συμπεράσματα 109
8.11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 121
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Η μέθοδος της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA) 148

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση
Εικόνα 3.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες
Εικόνα 3.3 Μηχανική εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών
Εικόνα 3.4 Θερμική εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών
Εικόνα 3.5 Αντίστροφη ώσμωση
Εικόνα 3.6 Ηλεκτροδιάλυση
Εικόνα 4.1 Ηλιακό και αιολικό δυναμικό της Ελλάδας
Εικόνα 5.1 Χάρτης νησιών Αιγαίου και ο πληθυσμός τους
Εικόνα 7.1 Χάρτης των Κυκλάδων
Εικόνα 7.2 Μοντέλο αφαλάτωσης Θηρασίας
Εικόνα 7.3 Μοντέλο αφαλάτωσης Μήλου
Εικόνα 7.4 Βασική δομή μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης
Εικόνα 7.5 Συγκριτικά αποτελέσματα LCA
Εικόνα 8.1 Δομή μοντέλου αφαλάτωσης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Οι δέκα χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή σε αφαλατωμένο νερό
Πίνακας 4.1 Συνδυασμός ΑΠΕ και τεχνολογιών αφαλάτωσης
Πίνακας 5.1 Μεταφερόμενες ποσότητες νερού σε άνυδρα νησιά για το 2006
Πίνακας 5.2 Ποσότητες και κόστος μεταφορά νερού
Πίνακας 5.3 Διαχρονική εξέλιξη του κόστους μεταφοράς νερού

Πίνακας 5.4 Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης σε Κυκλάδες και Δωδεκάνησα
Πίνακας 5.5 Μέσες ημερήσιες μεταφερθείσες ποσότητες νερού στη νήσο Μήλο (σε m^3)
Πίνακας 5.6 Ανάλυση κόστους εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης
Πίνακας 5.7 Υπολογισμός κόστους νερού αφαλάτωσης (σε €/έτος)
Πίνακας 6.1 Κόστος αφαλάτωσης νερού για διαφορετικό νερό τροφοδοσίας
Πίνακας 6.2 Κόστος παραγωγής νερού με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας
Πίνακας 6.3 Θερμικές μέθοδοι και κόστος παραγωγής φρέσκου νερού
Πίνακας 6.4 Κόστος αφαλάτωσης νερού με χρήση μεμβρανών (αντίστροφη ώσμωση)
Πίνακας 7.1 Κατάλογος υλικών για το σύστημα αφαλάτωσης στη Θηρασία (300m^3/έτος)
Πίνακας 7.2 Κατάλογος υλικών για το σύστημα αφαλάτωσης στη Μήλο (450,000m^3/έτος)
Πίνακας 7.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά m^3 (CML-2000)
Πίνακας 7.4 Επίδραση της κάθε φάσης της LCA στην κλιματική αλλαγή
Πϊνακας 8.1 Εκπομπές CO_2 από διαφορετικές πηγές ενέργειας
Πίνακας 8.2 Εκπομπές CO_2 για την αφαλάτωση νερού
Πίνακας 8.3 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2 όταν χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα
Πίνακας 8.4 Οριακές τιμές CO_2 ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά για διαφορετικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
Πίνακας 8.5 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2 όταν χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες
Πίνακας 8.6 Οριακές τιμές CO_2 ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από ανεμογεννήτριες για διαφορετικό κόστος συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.1 Εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής αφαλατωμένου νερού
Διάγραμμα 3.2 Κατανομή των εργοστασίων αφαλάτωσης ανα μέθοδο
Διάγραμμα 5.1 Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν σε άνυδρα νησιά των Κυκλάδων και Δωδεκανήσων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διδακτορική αυτή διατριβή έχει ως στόχο να αξιολογήσει τόσο από οικονομικής όσο και περιβαλλοντικής απόψεως επιλεγμένα συστήματα αφαλάτωσης νερού στον ελληνικό νησιωτικό χώρο, ωστέ να χαραχτεί η σωστή στρατηγική για το πρόβλημα της έλλειψης νερού που αντιμετωπίζεται σήμερα και το οποίο αναμένεται μελλοντικά να γίνει ακόμα πιο έντονο.

Στα πλαίσια λοιπόν αυτής της διδακτορικής εργασίας αρχικά γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι μέθοδοι χωρίζονται σε θερμικές, στις οποίες απαιτείται θερμότητα και παρατηρείται αλλαγή φάσης, και σε μεμβρανών, στις οποίες το φρέσκο νερό διαχωρίζεται από την άλμη με χρήση ειδικών μεμβρανών. Σήμερα, η κυρίαρχη μέθοδος σε όλον τον κόσμο, αλλά και στον ελληνικό νησιωτικό κόσμο είναι αυτή της αντίστροφης ώσμωσης. Λόγω του γεγονότος ότι για την αφαλάτωση του νερού είναι αναγκαία η χρήση ενέργειας, γίνεται αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που αποτελούν τον πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο παραγωγής ενέργειας, και ερευνάται πώς αυτές συνδυάζονται με τις διαφορετικές μεθόδους αφαλάτωσης.

Έπειτα αναλύεται το κόστος των μονάδων αφαλάτωσης για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής της ενέργειας όταν αυτές εγκατασταθούν σε ένα ελληνικό νησί. Βρέθηκε πως η αφαλάτωση νερού είναι αρκετά φθηνότερη σε σχέση με τη μεταφορά νερού με πλοία που είναι ο σημερινός τρόπος επίλυσης του προβλήματος της έλλειψης νερού στα ελληνικά νησιά σήμερα. Στα πλαίσια αυτά έγινε και σχετική μελέτη, όπου περιγράφεται συνολικά η παρούσα κατάσταση στα ελληνικά νησιά, σχετικά με το πρόβλημα της έλλειψης νερού. Αναφέρονται όλες οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης και σαν μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιείται το νησί της Μήλου για το οποίο υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης μιας μονάδας αφαλάτωσης νερού. Αποδείχτηκε πως η αφαλάτωση είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα από την

μεταφορά νερού με υδροφόρες, έχοντας κόστος που μπορεί να είναι χαμηλότερο μέχρι και πέντε φορές.

Στη συνέχεια κατέστη σαφές πως το κόστος της αφαλάτωσης έπρεπε να μελετηθεί όχι μόνο στον ελληνικό νησιωτικό χώρο, αλλά να διαπιστωθεί πού κυμαίνεται και στον υπόλοιπο κόσμο. Αφού λοιπόν μελετήθηκαν πολλές διαφορετικές περιπτώσεις εγκαταστάσεων, έγιναν οι απαραίτητες ομαδοποιήσεις ώστε να καθοριστούν τα όρια ανάμεσα στα οποία μπορεί να κινείται το κόστος της αφαλάτωσης. Οι ομαδοποιήσεις κρίθηκαν αναγκαίες καθώς μια μονάδα αφαλάτωσης έχει διαφορετικό κόστος ανάλογα με το μέγεθός της, τη μέθοδο αφαλάτωσης που μπορεί να χρησιμοποιείται, την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, το σημείο που είναι εγκατεστημένη και φυσικά όντας ενεργοβόρος μέθοδος, τον τρόπο παραγωγής της ενέργειας. Στο σημείο αυτό κατέστη εμφανές, πως αν και μέχρι τώρα το νερό χρησιμοποιείτο για την παραγωγή ενέργειας, κυρίως μέσω υδροηλεκτρικών σταθμών, τώρα πλέον είναι αναγκαία η ενέργεια για την παραγωγή νερού. Βρέθηκε από τη μελέτη των διαφορετικών περιπτώσεων πως το φθηνότερο αφαλατωμένο νερό προέρχεται από μονάδες με σχετικά μεγάλο μέγεθος, δυναμικότητας πάνω από 60.000 m^3 φρέσκου νερού την ημέρα. Επίσης όσο χαμηλότερη είναι η περιεκτικότητα του νερού τροφοδοσίας σε ολικά διαλυτά στερεά, τόσο χαμηλότερο είναι και το κόστος του παραγόμενου νερού λόγω της χαμηλότερης απαιτούμενης ενέργειας. Τέλος διαπιστώθηκε πως όταν χρησιμοποιούνται συμβατικές μορφές ενέργειας, λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής τους και της μη διακοπτόμενης λειτουργίας των συστημάτων αφαλάτωσης είναι πολύ οικονομικότερες σε σχέση με τη χρήση ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές.

Στο σημείο αυτό έγινε εμφανές πως αν και το κόστος της αφαλάτωσης είναι χαμηλότερο όταν χρησιμοποιούνται συμβατικές μορφές ενέργειας, θα έπρεπε να υπολογιστεί και η περιβαλλοντική επιβάρυνση που δημιουργεί μια μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί συμβατικές μορφές ενέργειας, σε σχέση με μια «καθαρότερη», όπως είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών. Για να υπολογιστεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση, δημιουργήθηκε ένα

μοντέλο το οποίο βασίστηκε στην μέθοδο της Εκτίμησης του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment) και με το οποίο υπολογίστηκε η περιβαλλοντική επίπτωση των συστημάτων αφαλάτωσης για δυο διαφορετικού μεγέθους μονάδες που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε δυο νησιά του μεγέθους της Μήλου ή της Θηρασιάς και να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του πληθυσμού σε πόσιμο νερό. Οι μονάδες αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν τόσο ρεύμα από το δίκτυο, όσο και ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες μορφές, ήτοι στην περίπτωσή μας από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά. Βρέθηκε λοιπόν πως η μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί ενέργεια προερχόμενη από ανεμογεννήτρια έχει την χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ακολουθούμενη από εκείνη που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά. Η επιβάρυνση από μια αμιγώς συμβατική μονάδα, είναι αρκετά υψηλότερη.

Έχοντας μελετήσει τις διαφορετικές πτυχές της αφαλάτωσης νερού, τόσο από άποψη κόστους όσο και περιβάλλοντος, έγινε σαφές ότι ο συνδυασμός και των δυο για την επιλογή της καλύτερης λύσης για το πρόβλημα της έλλειψης νερού έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι αυτός που μπορεί να οδηγήσει στη χάραξη της σωστής στρατηγικής στο πρόβλημα της έλλειψης νερού στον ελληνικό νησιωτικό χώρο. Μια τέτοια ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής διάστασης στα οικονομικά της αφαλάτωσης, δεν έχει αναφερθεί πουθενά στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα. Πέρα λοιπόν από την έρευνα, σχετιζόμενη τόσο με τα οικονομικά όσο και με τα περιβαλλοντικά θέματα που συνοδεύουν την εγκατάσταση μιας μονάδας αφαλάτωσης νερού, κρίθηκε απαραίτητη ουσιαστικά η δημιουργία μιας φόρμουλας που ενσωματώνει στην ίδια σχέση και τις δυο αυτές διαφορετικές παραμέτρους. Αποτιμήθηκε έτσι το περιβαλλοντικό κόστος και δόθηκε απάντηση στο πραγματικό ερώτημα, πόσο θα πρέπει να είναι το κόστος του CO_2 ώστε να μην χρησιμοποιούμε συμβατικές μορφές ενέργειας αλλά ανανεώσιμες για την αφαλάτωση νερού. Η μελέτη αυτή έδειξε πως η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως

ανεμογεννητριών, συνεκτιμώντας το περιβαλλοντικό κόστος είναι η καλύτερη λύση για την παραγωγή φρέσκου νερού στα ελληνικά νησιά.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής αυτής διατριβής έγιναν τέσσερις δημοσιεύσεις βασισμένες σε κείμενα από τη διατριβή. Οι δημοσιεύσεις αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται στο παρόντα τόμο, αλλά είναι διαθέσιμες για μελετητές που πιθανώς να τις ζητήσουν.
Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των ανωτέρω δημοσιεύσεων:

Στην δημοσίευση "**Current status of water desalination in the Aegean Islands.** *Desalination*, 203 (2007) 56-61" αναλύεται η παρούσα κατάσταση της αφαλάτωσης στην Ελλάδα. Αναφέρονται όλες οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης, καθώς και στοιχεία σχετικά με τις μεταφερόμενες ποσότητες στα Ελληνικά νησιά. Χρησιμοποιείται επίσης ως μελέτη περίπτωσης το νησί της Μήλου για το οποίο υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης μιας μονάδας αφαλάτωσης νερού. Αποδείχτηκε πως η αφαλάτωση είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα από την μεταφορά νερού με υδροφόρες, έχοντας κόστος που μπορεί να είναι χαμηλότερο μέχρι και πέντε φορές.
Στην δημοσίευση "**Water desalination cost literature: Review and assessment**, *Desalination*, 223 (2008) 458-466" παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των άρθρων σχετιζόμενων με το κόστος αφαλάτωσης νερού. Τα άρθρα αυτά ταξινομούνται και όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται σε αυτά ομαδοποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο αφαλάτωσης, τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται, το νερό τροφοδοσίας και το μέγεθος των εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης. Η συγκεκριμένη δημοσίευση απεδείχθη εξαιρετικά επιτυχής, αφού βρίσκεται από το 2009 σε διάφορες θέσεις στη λίστα των 25 πιο πολύ ζητουμένων άρθρων του περιοδικού Desalination της Elsevier.
Στην δημοσίευση "**Life cycle assessment of water desalination systems in Milos and Thirasia islands**. *1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS)*

June 2009” υπολογίζεται η περιβαλλοντική επίπτωση των συστημάτων αφαλάτωσης για δυο διαφορετικού μεγέθους μονάδες που χρησιμοποιούν διαφορετικές μορφές ενέργειας για την τροφοδοσία τους και θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε δυο νησιά του μεγέθους της Μήλου ή της Θηρασιάς. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Εκτίμησης του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment) και βρέθηκε πως η μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί ενέργεια προερχόμενη από ανεμογεννήτρια έχει την χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ακολουθούμενη από εκείνη που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά.

Τέλος, στην δημοσίευση “**Estimation of critical CO2 values when planning the power source in water desalination. The case of the small Aegean islands.** *Energy Policy*, 38 (2010) 3891-3897” πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του κόστους του CO_2 ώστε να καταστεί συμφέρουσα από οικονομικής απόψεως η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία μονάδων αφαλάτωσης νερού έναντι των συμβατικών. Βρέθηκε πως η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως ανεμογεννητριών, συνεκτιμώντας το περιβαλλοντικό κόστος είναι η καλύτερη λύση για την παραγωγή φρέσκου νερού στα ελληνικά νησιά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΝΕΡΟΥ, ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Το νερό συγκαταλέγεται στους πιο σημαντικούς πόρους που η ανθρωπότητα διαθέτει καθώς είναι απαραίτητο για τόσο για την ισορροπία όσο και τη διατήρηση της υγείας των οικοσυστημάτων. Βρίσκεται σε αφθονία στον πλανήτη, καλύπτοντας τα τρία τέταρτα της επιφάνειας του. Παρόλα αυτά, το 97,5% του νερού του πλανήτη είναι θαλασσινό και μόλις το 2,5% μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο. Αυτό το μικρό ποσοστό εξυπηρετεί τις ανθρώπινες ανάγκες και βρίσκεται στους πόλους (με τη μορφή πάγου), στις λίμνες, στα ποτάμια και στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Συνολικά. το διαθέσιμο φρέσκο νερό είναι περίπου 0,007% της συνολικής ποσότητας που υπάρχει στον πλανήτη [1].

Σήμερα, το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει επαρκή προσφορά φρέσκου νερού όσον αφορά στην ποσότητα αλλά και στην ποιότητα. Το πρόβλημα του νερού αφορά σχεδόν 80 χώρες. Η ξηρασία και η ερημοποίηση αναμένεται να οξύνουν το πρόβλημα και να αυξήσουν τον αριθμό των «προβληματικών χωρών». Ακόμα, η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού από τα 6 δις που είναι σήμερα στα 8 δις (με βάση εκτιμήσεις) το 2025 θα καταστήσουν το πρόβλημα ένα από τα μεγαλύτερα παγκόσμια προβλήματα [1]. Σύμφωνα με άλλες εκτιμήσεις, μέχρι το 2025, 1,8 δις άνθρωποι θα ζουν σε περιοχές με απόλυτη έλλειψη νερού και τα δύο τρίτα του συνολικού πληθυσμού θα αντιμετωπίζουν πολύ σοβαρό πρόβλημα έλλειψης [2].

Το πρόβλημα της έλλειψης νερού διογκώνεται στην εποχή μας λόγω της κλιματικής αλλαγής, ειδικά στις πιο ξηρές περιοχές του πλανήτη. Η ανθρώπινη επίδραση στο περιβάλλον και στο κλίμα πρέπει να αντιμετωπιστεί ώστε να προστατευθούν οι υδάτινοι πόροι της γης. Παρόλα αυτά όσο ο πληθυσμός αυξάνεται, και η ανάπτυξη απαιτεί όλο και περισσότερη χρήση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, υπόγειων αλλά και

υπέργειων για χρήση κυρίως στη γεωργία, στη βιομηχανία αλλά και στα νοικοκυριά, η πίεση αυξάνεται, δημιουργώντας εντάσεις και αψιμαχίες μεταξύ των χρηστών του αλλά επίσης και πολύ μεγάλη πίεση στο περιβάλλον. Ειδικά η γεωργία αποτελεί βέβαια τον μεγαλύτερο χρήστη των διαθέσιμων υδάτινων πόρων καθώς η παραγωγή τροφίμων αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα διατήρησης της ζωής στον πλανήτη. Η αυξημένη πίεση που έχει προκληθεί για τους υδάτινους πόρους τόσο από την αυξημένη ζήτηση αλλά και από την αύξηση της παγκόσμιας μόλυνσης αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης νερού απαιτεί δράσεις τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Επίσης απαιτεί δράσεις σε διεθνές και παγκόσμιο επίπεδο, οδηγώντας έτσι σε συνεργασίες μεταξύ των κρατών για κοινή διαχείριση υδατικών πόρων, όπως ποτάμια, λίμνες κ.α. Απαιτείται έτσι μια ευρεία προσέγγιση για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, χωρίς από την άλλη να διαταραχτεί η ισορροπία ζωτικών οικοσυστημάτων. Για το πρόβλημα της έλλειψης νερού πολλές λύσεις έχουν εφαρμοστεί εως σήμερα που αφορούν στην καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, στην βελτίωση των υποδομών (όπως είναι η κατασκευή νέων ταμιευτήρων, φραγμάτων κ.α.) αλλά και νεότερες λύσεις, όπως αυτή της αφαλάτωσης νερού.

Η αφαλάτωση όπως μαρτυρά και η ετυμολογία της λέξης (από+άλας) είναι η διεργασία αποχωρισμού αλάτων και νερού από υδατικά διαλύματα. Χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση, οικιακή, ως πόσιμο νερό, βιομηχανική και αγροτική. Για την αφαλάτωση χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι οι οποίες είτε απομακρύνουν τα άλατα από το νερό ή το νερό από τα άλατα. Το κόστος του αφαλατωμένου νερού είναι πάντοτε κατά πολύ μεγαλύτερο από το κόστος του φυσικού νερού το οποίο μεταφέρεται από μια πηγή σε σχετικά μέτρια χιλιομετρική απόσταση. Κατάλληλο ως πόσιμο νερό θεωρείται αυτό που περιέχει λιγότερα από 500 ppm (μέρη στο εκατομμύριο) ολικά διαλυτά στερεά. Υφάλμυρο θεωρείται το νερό στο οποίο τα ολικά διαλυτά στερεά είναι μέχρι 10.000 ppm, ενώ το

θαλασσινό νερό περιέχει από 10.000 μέχρι και περίπου 42.000 ppm. Ενδεικτικά να αναφερθεί πως στη Νεκρά Θάλασσα τα ολικά διαλυτά στερεά αγγίζουν τα 220.000 ppm. [3]

Η διαδικασία της αφαλάτωσης απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας ώστε να διαχωριστούν τα άλατα από το νερό. Γεγονός πολύ σημαντικό καθώς είναι ένα διαρκές κόστος, το οποίο, αν εξαιρέσουμε τις χώρες που είναι πλούσιες σε κοιτάσματα πετρελαίου, λίγες μόνο από τις χώρες που έχουν ανάγκη σε πόσιμο νερό μπορούν να αντέξουν.

Βέβαια, οι σύγχρονες μέθοδοι αφαλάτωσης μπορεί να εξελίσσονται διαρκώς τα τελευταία χρόνια λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης, αλλά η πρακτική δεν είναι σημερινή. Ήδη από την αρχαιότητα ο Αριστοτέλης περιέγραφε μια μέθοδο με την οποία προκαλούσε εξάτμιση σε ακάθαρτο νερό και στη συνέχεια το συμπύκνωνε ώστε να αποκτήσει πόσιμο νερό. Υπάρχουν επίσης αναφορές για αφαλάτωση νερού σε καράβια στην αρχαιότητα, όπου οι ναύτες έβραζαν το θαλασσινό νερό μέσα σε μπρούτζινα δοχεία τα οποία έκλειναν με σφουγγάρια ώστε να απορροφήσουν τους υδρατμούς. Στη συνέχεια τα έστυβαν και χρησιμοποιούσαν το παραγόμενο νερό. Αναφορές τόσο για την εξέλιξη της αφαλάτωσης όσο και για αυτή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δίνονται στη βιβλιογραφία [4].

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης νερού συνδέεται με την επίλυση πολλών προβλημάτων και όχι μόνο με αυτά που συνδέονται με την αγροτική παραγωγή. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν από την προστασία του περιβάλλοντος και την παγκόσμια υπερθέρμαση μέχρι και την σωστή τιμολόγηση των υδατικών πόρων και την ορθολογικότερη χρήση τους για άρδευση αλλά και βιομηχανική και οικιακή χρήση. Για το λόγο αυτό δεν θα μπορούσε κάποιος να επιρρίψει την ευθύνη του προβλήματος αυτού στον αγροτικό τομέα, άλλα όλοι – διεθνεις οργανισμοί, κυβερνήσεις, τοπικές κοινωνίες – έχουν ευθύνες που τους αναλογούν.

Βιβλιογραφία

1. Fiorenza, G., V.K. Sharma, and G. Braccio, *Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant.* Energy Conversion & Management, 2003. **44**: p. 2217-2240.
2. FAO, *Water & poverty, an issue of life & livelihoods.* (available online), 2010.
3. Delyianni, E. and B. Belessiotis, *Methods and Desalination Systems - Principles of the desalination process.* 1995, Athens, Greece: NCSR "Demokritos".
4. Delyannis, E., *Historic background of desalination and renewable energies.* Solar energy, 2003. **75**: p. 357-366.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων αφαλάτωσης καθώς επίσης και των υπαρχουσών μονάδων αφαλάτωσης στον κόσμο. Δίνονται επίσης πληροφορίες σχετικά με τις υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης στον κόσμο.

3.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης

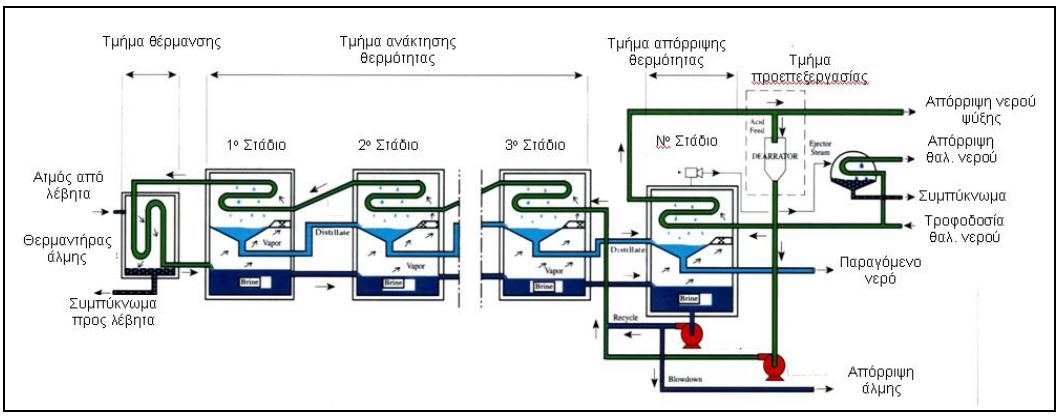
Οι μέθοδοι αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. Σε μεθόδους αλλαγής φάσης, στις οποίες απαιτείται θερμότητα και παρατηρείται αλλαγή φυσικής κατάστασης. Οι πιο εμπορικές είναι η πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση, η εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες και η εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών.
2. Σε μεθόδους μιας φάσης ή μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες. Οι πιο συνηθισμένες είναι η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση.

Όλες οι μέθοδοι απαιτούν μια χημική προ-επεξεργασία του εισερχόμενου νερού, προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ιζήματος, ο αφρός, η διάβρωση, η ανάπτυξη και η επικάθιση παθογόνων, αλλά και η η επικάθιση αλάτων στο κύκλωμα που διακινεί το νερό της τροφοδοσίας. Επίσης απαιτείται μια μετά-επεξεργασία, ώστε το αφαλατωμένο νερό να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά του πόσιμου νερού και γενικότερα να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα.

3.2.1 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (Multi Stage Flash Distillation)

Είναι η πιο διαδεδομένη θερμική μέθοδος (93% των χρησιμοποιούμενων θερμικών εφαρμογών) και παράγει το 44% του αφαλατωμένου νερού στον κόσμο ανεξαρτήτως μεθόδου [1]. Οι πρώτες εγκαταστάσεις εμφανίστηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1950. Είναι μέθοδος για μεγάλες και πολύ μεγάλες ποσότητες. Βασίζεται στη δημιουργία ατμού από θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό λόγω της ξαφνικής μείωσης της πίεσης, όταν το νερό εισέρχεται σε έναν άδειο θάλαμο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά στάδια με συνεχώς μειωμένες πιέσεις και απαιτεί εξωτερική παροχή ατμού, σε θερμοκρασία γύρω στους 100°C (Εικόνα 3.1). Για την αποφυγή επικαθίσεων άλατος, η μέγιστη θερμοκρασία περιορίζεται και για το λόγο αυτό η απόδοση της τεχνολογίας είναι χαμηλή.

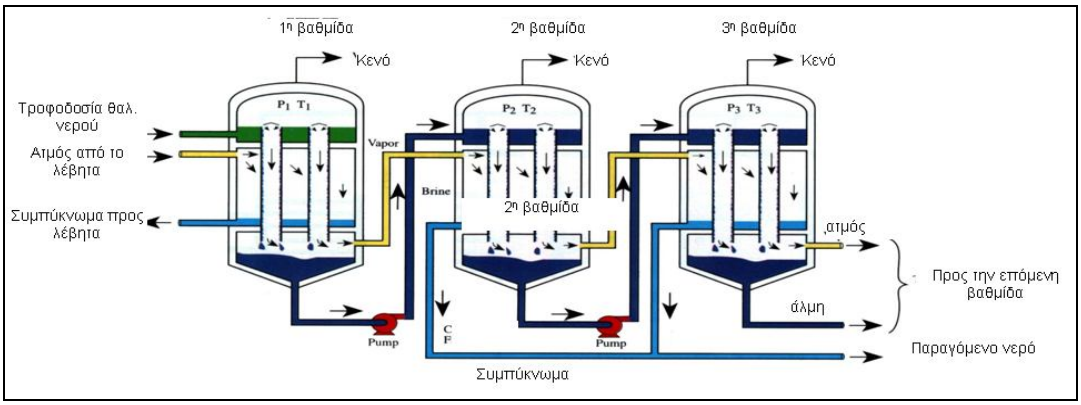


Εικόνα 3.1 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση [2]

3.2.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multi Effect Distillation)

Αποτελεί την πρώτη μέθοδο αφαλάτωσης. Χρησιμοποιήθηκε στη χημική βιομηχανία σχεδόν από την εποχή που ανακαλύφθηκε ο ατμός και η πρώτη

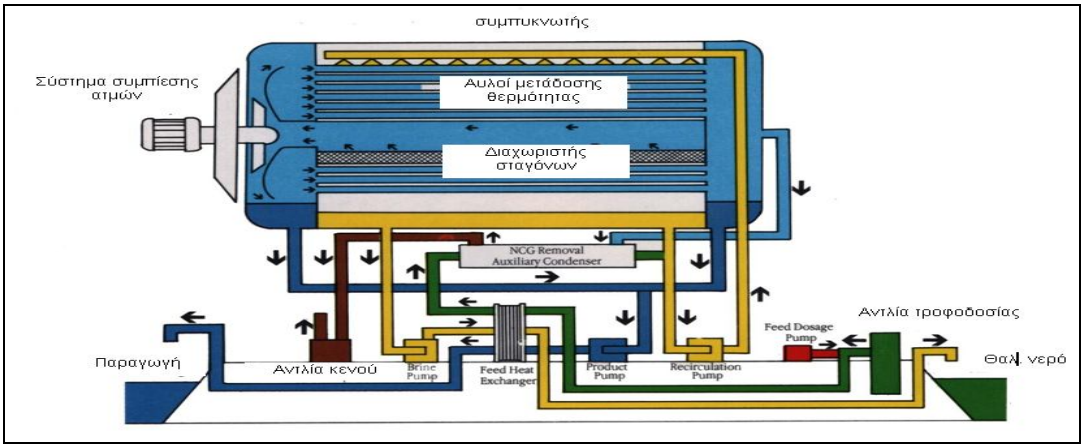
εγκατάσταση στο έδαφος έγινε το 1910. Είναι μέθοδος απλή, για κατασκευές με μικρές ως μεσαίες παροχές, γι' αυτό χρησιμοποιείται σε μικρότερη κλίμακα απ' ότι η MSF αν και έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Τα εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων αποτελούνται από μια δέσμη σωλήνων η θύσανο σωλήνων με οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη και από ένα περίβλημα ή κέλυφος που περιβάλλει τους σωλήνες [3]. Στη μέθοδο αυτή οι ατμοί δημιουργούνται λόγω της απορρόφησης της θερμικής ενέργειας από το αλμυρό νερό. Ο ατμός που δημιουργείται σε μια βαθμίδα θερμαίνει το αλατώδες διάλυμα στην επόμενη βαθμίδα επειδή η τελευταία είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση, το οποίο ενώ συμπυκνώνεται προκαλεί εξάτμιση ενός μέρους του διαλύματος. Ο παραγόμενος ατμός κατευθύνεται στην επόμενη βαθμίδα, όπου καθώς συμπυκνώνεται προκαλεί την εξάτμιση του άλλου διαλύματος κ.ο.κ. Για να καταστεί εφικτή αυτή η διαδικασία πρέπει η θερμαινόμενη βαθμίδα να διατηρείται σε πίεση χαμηλότερη από αυτή της βαθμίδας από την οποία ο θερμαινόμενος ατμός προέρχεται. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τον αριθμό των βαθμίδων. Τα εργοστάσια που στηρίζονται σε αυτή τη μέθοδο αφαλάτωσης χρησιμοποιούν εξωτερική παροχή ατμού θερμοκρασίας γύρω στους 70°C. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.2 [4].



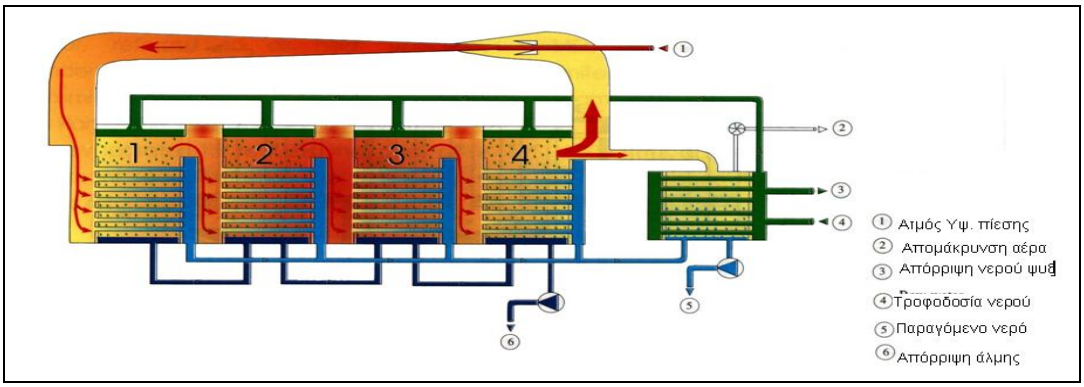
Εικόνα 3.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες [2]

3.2.3 Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor compression)

Χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα από το 1930 και η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού για κοινοτική χρήση έγινε τη δεκαετία του 1950. Κατασκευάζονται σε μικρές χωρητικότητες. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται εξατμιστήρια πολλαπλών βαθμίδων. Αφού ο αρχικός ατμός δημιουργηθεί από το αλατώδες διάλυμα, συμπιέζεται θερμικά ή μηχανικά ώστε να δημιουργήσει πρόσθετη παραγωγή. Σε ένα εργοστάσιο επανασυμπίεσης ατμών η ανάκτηση της θερμότητας βασίζεται στην αύξηση της πίεσης του ατμού από ένα στάδιο με τη βοήθεια συμπιεστή. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης αυξάνει τότε και ο ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ενέργειας στην φάση από την οποία προήλθε ή σε άλλες. Όπως σε ένα συμβατικό σύστημα εξάτμισης με πολλαπλές βαθμίδες (MED) ο ατμός που παράγεται στην πρώτη βαθμίδα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της επόμενης, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση. Ο ατμός που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα διοχετεύεται σε έναν συμπιεστή ατμών, όπου συμπιέζεται και η θερμοκρασία κορεσμού αυξάνει πριν επιστραφεί στην πρώτη βαθμίδα. Ο συμπιεστής αποτελεί την κύρια εισροή ενέργειας στο σύστημα και αν η λανθάνουσα θερμότητα ανακυκλώνεται αποκλειστικά στο εργοστάσιο, η διαδικασία μπορεί να δώσει υψηλούς συντελεστές απόδοσης. Διακρίνονται σε μηχανικές μεθόδους επανασυμπίεσης (Εικόνα 3.3) και σε θερμικές μεθόδους επανασυμπίεσης ατμών (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.3 Μηχανική εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών [2]



Εικόνα 3.4 Θερμική εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών [2]

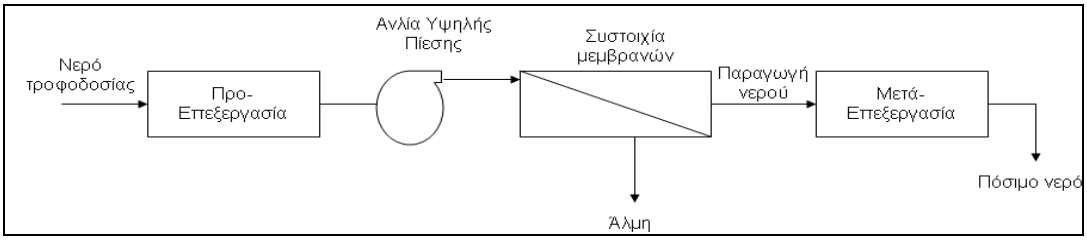
3.2.4 Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis)

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω έχουν ως θεμελιώδη αρχή την αλλαγή φάσης του διαλύματος. Υπάρχουν όμως και μέθοδοι στις οποίες δεν παρατηρείται καμμία αλλαγή φάσης αλλά στηρίζονται στη χρήση μεμβρανών και οι οποίες είναι η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση.

Η αντίστροφη ώσμωση αφορά στο 88% των μεθόδων που χρησιμοποιούν μεμβράνες και στο 42% της παγκόσμιας παραγωγής αφαλατωμένου νερού [1] και χρησιμοποιεί μηχανική ενέργεια. Εφαρμόστηκε γύρω στο 1960,

αρχικά μόνο για την αφαλάτωση υφάλμυρων υδάτων. Από το 1970, έπειτα από τη βελτίωση των ημιπερατών μεμβρανών, ξεκίνησε η εφαρμογή της σε βιομηχανική κλίμακα για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης, μεγαλύτερης της ωσμωτικής σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιό διάλυμα με ένα ημιπερατό τοίχωμα ή μια διεκλεκτική μεμβράνη. Διαχωρίζει δηλαδή το νερό από τα άλατα σε ένα διάλυμα, μέσω της πίεσης που ασκείται στις μεμβράνες. Το σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης στηρίζεται στις ιδιότητες των ημιπερατών μεμβρανών, οι οποίες όταν χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του νερού από ένα αλατώδες διάλυμα, επιτρέπουν στο φρέσκο νερό να ενσωματωθεί στο θάλαμο της άλμης (brine) λόγω της ωσμωτικής πίεσης. Αν ασκηθεί μια επαρκής δύναμη στο αλατώδες διάλυμα, τότε το φρέσκο νερό θα περάσει από την άλμη στο θάλαμο του νερού. Θεωρητικά η μόνη ενεργειακή απαίτηση αφορά στην πίεση του νερού τροφοδοσίας με μια πίεση μεγαλύτερη της ωσμωτικής. Πρακτικά, για να υπάρχει ικανοποιητική διέλευση νερού από τη μεμβράνη, πρέπει να εφαρμοστούν μεγαλύτερες πιέσεις, της τάξης των 50-80 ατμοσφαιρών για το θαλασσινό νερό και 15-25 για το υφάλμυρο. Το νερό τροφοδοσίας πιέζεται από μια αντλία υψηλής πίεσης και εξαναγκάζεται σε ροή μέσω της μεμβράνης. Μέρος του διαλύματος αυτού περνά μέσω της μεμβράνης η οποία συγκρατεί την πλειονότητα των στερεών διαλυτών. Τα υπολείμματα καθώς και τα εναπομένοντα άλατα αποβάλλονται με υψηλή πίεση. Συνήθως πριν από την διοχέτευση του προς αφαλάτωση νερού στη μονάδα της αντίστροφης ώσμωσης, εφαρμόζεται προκατεργασία με νανο-διήθηση η οποία συμβάλλει στη μείωση της σκληρότητας του νερού και συνεπώς στη μείωση της πίεσης που απαιτεί η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης [4]. Ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης περιλαμβάνει την προ-επεξεργασία όπου γίνεται καλό φιλτράρισμα του νερού και προστίθενται χημικά για αποτροπή εμφάνισης ιζημάτων και μικροοργανισμών, την αντλία υψηλής πίεσης, τις μεμβράνες και την τελική κατεργασία που αφορά κυρίως στην

απομάκρυνση αερίων και στην προσαρμογή του pH (Εικόνα 3.5). Αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος της μεθόδου βαίνει συνεχώς μειούμενο καθώς το κόστος των μεμβρανών φθίνει ενώ ταυτόχρονα η διάρκεια ζωής τους αυξάνει. [5]

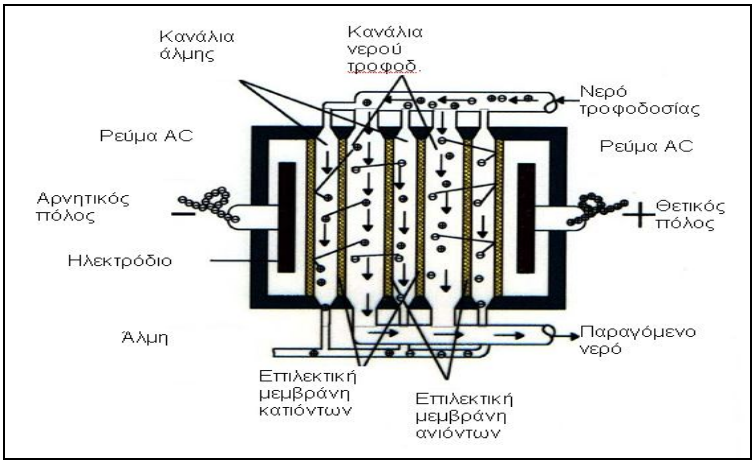


Εικόνα 3.5 Αντίστροφη ώσμωση

3.2.5 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια. Εμφανίστηκε σε βιομηχανική κλίμακα γύρω στο 1960. Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού, στην οποία τα ιόντα μεταφέρονται μέσα από μεμβράνες από την πλευρά όπου το διάλυμα έχει τη μικρότερη συγκέντρωση ιόντων σε αυτή με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση και με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος [3]. Η μέθοδος χρησιμοποιεί συνεχές ηλεκτρικό πεδίο ώστε να απομακρύνει τα ιόντα αλάτων στο υφάλμυρο νερό (Εικόνα 3.6). Το νερό τροφοδοσίας περιέχει διαλυμένα άλατα τα οποία είναι χωρισμένα σε θετικά φορτισμένο νάτριο (Na^+) και αρνητικά φορτισμένα χλωριούχα ιόντα (Cl^-). Αυτά τα ιόντα θα κινηθούν προς ένα αντίθετα φορτισμένο ηλεκτρόδιο εμβαπτισμένο στο διάλυμα, ήτοι τα θετικά ιόντα (κατιόντα) θα πάνε στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Αν ειδικές μεμβράνες, εναλλασσόμενα περατές από τα ανιόντα και τα κατιόντα, χωρίσουν τα ηλεκτρόδια, το κεντρικό κενό ανάμεσα από αυτές τις μεμβράνες θα εξαντληθεί από άλατα. Στην πράξη, ένας μεγάλος αριθμός

μεμβρανών εναλλακτικά κατιόντων και ανιόντων, στοιβάζονται μαζί, χωρισμένες από πλαστικά διαστήματα ροής που επιτρέπουν τη διέλευση του νερού. Τα ρεύματα των εναλλασσόμενων διαστημάτων ροής είναι μια ακολουθία διαλυμένου και συγκεντρωμένου νερού που ρέουν παράλληλα το ένα στο άλλο. Για να αποφευχθεί το ξεφλούδισμα εναλλάκτες χρησιμοποιούνται και αντιστρέφουν την πολικότητα του ηλεκτρικού πεδίου κάθε είκοσι λεπτά περίπου. Καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος είναι ανάλογες της αλατότητας του νερού, η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης εφαρμόζεται κυρίως σε αφαλάτωση νερού με συνολικά διαλυτά στερεά της τάξης των 6.000 ppm. Παρομοίως, λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας η οποία αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις για πολύ καθαρό νερό, η διαδικασία δεν ενδείκνυται για νερό με περιεχόμενα διαλυτά στερεά λιγότερα των 400 ppm [5].



Εικόνα 3.6 Ηλεκτροδιάλυση [2]

3.2.6 Υβριδικές μέθοδοι

Είναι συνδυασμοί διαφόρων μεθόδων σε παράλληλη λειτουργία για επίτευξη καλύτερων αποδόσεων σε αφαλατωμένο νερό και χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Ήδη, οι Turek και Dydo είχαν δείξει πως η

μέθοδος RO μπορούσε να συναγωνιστεί τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης αν η συγκέντρωση των αλάτων του νερού τροφοδοσίας ήταν μικρότερη από 70 g/l. Έδειξαν επίσης πως η απόδοση της αφαλάτωσης που επιτυγχάνεται με ένα υβριδικό σύστημα μεμβρανών-θερμικό είναι υψηλότερη από αυτή των απλών μεθόδων με μεμβράνες, η κατανάλωση ενέργειας ήταν μειωμένη κατά 25-30%, ενώ επιπλέον η διαδικασία ήταν φιλικότερη προς το περιβάλλον, καθώς μειώθηκε η κατανάλωση των χρησιμοποιούμενων χημικών. Τέλος η αύξηση που παρατηρήθηκε στο παραγόμενο φρέσκο νερό ήταν της τάξης του 70%, η οποία συνέβαλε στην μείωση του εκτιμώμενου κόστους του φρέσκου νερού περισσότερο από 27% [6].

Οι Almulla et al. περιγράφουν ένα σύστημα στο οποίο συνδυάζονται δύο από τις θερμικές μεθόδους (MED, MSF) με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης (RO). Αφορά ένα καινούργιο εργοστάσιο που χτίστηκε πρόσφατα στα Ενωμένα Αραβικά Εμιράτα με δυνατότητα παραγωγής 100 εκατ. γαλόνια την ημέρα, δηλαδή περίπου 400.000 m^3/μέρα [7]. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του υβριδικού αυτού συστήματος έναντι του απλού συστήματος (που στηρίζεται σε θερμικές μεθόδους) είναι τα ακόλουθα:

1. Η συνολική ανάκτηση του νερού είναι μεγαλύτερη καθώς η αφαλάτωση με τη μέθοδο RO μας δίνει φρέσκο νερό σε ποσοστό 30-45% του νερού τροφοδοσίας, ενώ οι θερμικές μέθοδοι ποικίλουν ανάμεσα στο 12-20%.
2. Εξαλείφεται μερικώς το μειονέκτημα της αργής εκκίνησης αλλά και του αργού σταματήματος που έχουν τα θερμικά συστήματα. Πρέπει να σημειωθεί πως η εκκίνηση ενός θερμικού συστήματος απαιτεί από 3-5 ώρες (3 ώρες με τη μέθοδο MED και 5 με την MSF), ενώ το σύστημα RO μπορεί να ανοίξει και να κλείσει σχεδόν στιγμιαία.
3. Το κόστος συντήρησης ενός συστήματος RO είναι μικρότερο και συνεπώς όταν συνδυαστεί με το μεγάλο κόστος του θερμικού συστήματος, το συνολικό κόστος μειώνεται.
4. Τα μειωμένα έξοδα για σωληνώσεις και ρυθμίσεις του συστήματος RO σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους, συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού κόστους.

Το υβριδικό αυτό σύστημα χρησιμοποιεί κατά 40% τη μέθοδο RO για την παραγωγή φρέσκου νερού. Η κατανάλωση καυσίμων έπεσε στους 115 τόνους/ώρα από 191 τόνους/ώρα που αντιστοιχούσε σε ετήσιο κέρδος της τάξης των 50-70 εκατ. $. Επίσης για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας φρέσκου νερού, μειώθηκαν οι απαιτήσεις σε νερό τροφοδοσίας από 188.000 m^3/ώρα σε 140.000 m^3/ώρα.
Καθίσταται σαφές λοιπόν πως τα υβριδικά συστήματα μπορεί να πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών αν και η χρήση τους αφορά κυρίως σε μονάδες πολύ υψηλής παραγωγικής δυναμικότητας.

3.3 Μονάδες αφαλάτωσης στον κόσμο

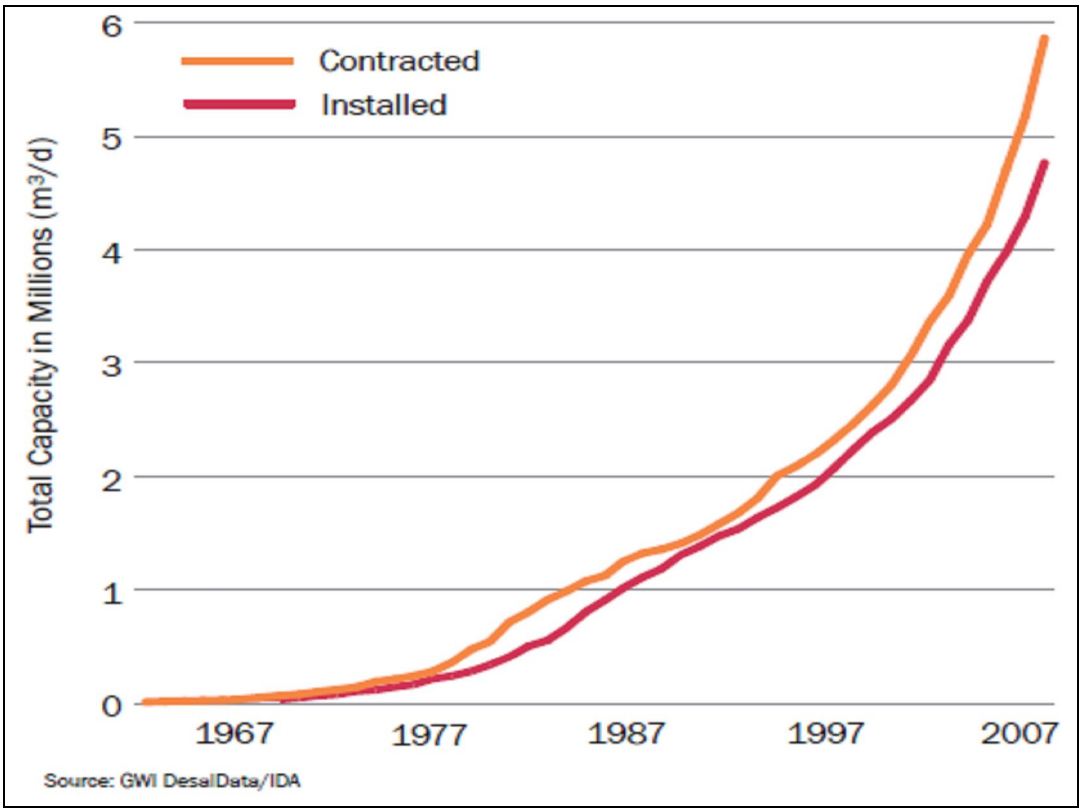
Παγκοσμίως υπάρχουν πάνω από 13.000 μονάδες αφαλάτωσης και η συνολική παραγόμενη ποσότητα αφαλατωμένου νερού ξεπερνά σήμερα τα πενήντα πέντε εκατ. κυβικά μέτρα. Από αυτήν την ποσότητα σχεδόν η μισή παράγεται σε λιγότερα απο 70 εργοστάσια τα οποία βρίσκονται στην πλειονότητά τους στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και στη Σαουδική Αραβία [8]. Οι δέκα χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγική δυναμικότητα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Οι δέκα χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή σε αφαλατωμένο νερό

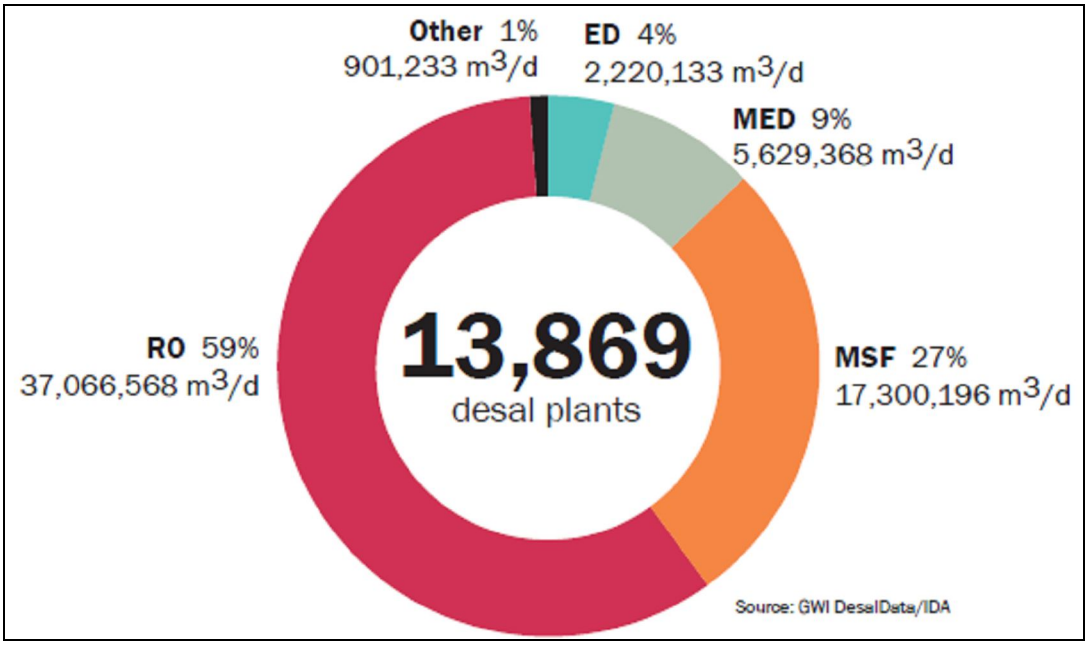
	Χώρα	Παραγωγική δυναμικότητα (σε εκατ. m^3/μέρα)	Ποσοστό στην παγκόσμια παραγωγή
1)	Σαουδ. Αραβία	10,760	17%
2)	ΗΑΕ	8,428	13%
3)	ΗΠΑ	8,133	13%
4)	Ισπανία	5,250	8%
5)	Κουβέιτ	2,877	5%
6)	Αλγερία	2,676	4%
7)	Κίνα	2,260	4%
8)	Κατάρ	1,713	3%
9)	Ιαπωνία	1,493	2%
10)	Αυστραλία	1,185	2%

Πηγή: GWI DesalData/IDA, 2008

Η εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης δυναμικότητας φαίνεται στο Διάγραμμα 3.1, ενώ στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζεται η κατανομή των συνολικά εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Όπως είναι εμφανές η παγκόσμια δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης αυξάνει συνεχώς, φανερώνοντας από τη μια μεριά τη σημασία της αφαλάτωσης στο πρόβλημα της έλλειψης νερού και καθιστώντας σαφές πως τα επόμενα χρόνια θα αποτελέσει τον κυρίαρχο τρόπο επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος.



Διάγραμμα 3.1 Εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής αφαλατωμένου νερού



Διάγραμμα 3.2 Κατανομή των εργοστασίων αφαλάτωσης ανα μέθοδο

3.4 Βιβλιογραφία

1. Rodriguez, L.G., *Renewable energy applications in desalination: state of the art.* Solar energy, 2003. **75**: p. 381-393.
2. Manolakos, D., *Doctoral Thesis.* 2008.
3. Delyianni, E. and B. Belessiotis, *Methods and Desalination Systems - Principles of the desalination process.* 1995, Athens, Greece: NCSR "Demokritos".
4. Kalogirou, S.A., *Seawater desalination using renewable energy sources.* Progress in Energy and Combustion Science, 2005. **31**(3): p. 242-281.
5. Buros, O.K., *The ABCs of Desalting.* 2000.
6. Turek, M. and P. Dydo, *Hybrid membrane-thermal versus simple membrane systems.* Desalination, 2003. **157**: p. 51-56.
7. Almulla, A., A. Hamad, and M. Gadalla, *Integrating hybrid systems with existing thermal desalination plants.* Desalination, 2005. **174**: p. 171-192.
8. IDA, *Desalination in 2008 - Global Market Snapshot.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην διαδικασία της αφαλάτωσης και αφορά περίπου στο 25-40% του συνολικού κόστους παραγωγής φρέσκου νερού. Το ποσοστό αυτό είναι παράμετρος των ενεργειακών αναγκών του εργοστασίου αφαλάτωσης, που εξαρτάται κυρίως από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, αλλά και του κόστους της ενέργειας αυτής. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να παράσχουν θερμική ενέργεια (ηλιακοί συλλέκτες, γεωθερμία,) ηλεκτρική ενέργεια (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες) ή μηχανική ενέργεια (ανεμογεννήτριες). Κάθε σύστημα αφαλάτωσης παρουσιάζει προβλήματα όταν συνδέεται με συστήματα παροχής ενέργειας που μεταβάλλονται, όπως συμβαίνει με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και για το λόγο αυτό είτε συνδέονται στο δίκτυο ή για τα αυτόνομα συστήματα προστίθεται κάποιο μικρό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι μπαταρίες, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή παροχή ενέργειας.

Αφορούν μόλις στο 1% των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. Αν και τα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δε μπορούν να συναγωνιστούν αυτά που χρησιμοποιούν συμβατικές όσον αφορά στο κόστος του παραγόμενου νερού, τα συστήματα αυτά βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε απομονωμένες περιοχές και αναμένεται να εξαπλωθούν λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον.

4.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της αφαλάτωσης είτε για να παράγει τη θερμική ενέργεια που απαιτείται ώστε να λειτουργήσουν οι μέθοδοι αλλαγής φάσης, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται στις μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες. Το υψηλό κόστος των φωτοβολταϊκών κυψελών και των ηλιακών αποστακτηρίων την καθιστούν ακριβή μέθοδο, εκτός και αν η μονάδα γίνεται σε πολύ απομονωμένη περιοχή.

Η φωτοβολταϊκή διαδικασία μετατρέπει το φως του ηλίου απευθείας σε ηλεκτρισμό. Παράγει ηλεκτρισμό χωρίς να εκπέμπει ρύπους και λειτουργεί αθόρυβα. Αποτελείται από δυο ή περισσότερα λεπτά στρώματα ημιαγωγών από πυρίτιο. Όταν το πυρίτιο εκτίθεται στο φως τότε δημιουργούνται ηλεκτρικές διεγέρσεις και οι μετακινήσεις των ηλεκτρονίων από τη μια θέση στην άλλη παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα που παράγεται από κάθε κυψέλη είναι πολύ μικρό οπότε πολλές κυψέλες ενώνονται και συμπυκνώνονται, ώστε να διαμορφώσουν μια μονάδα, η οποία λέγεται και πλαίσιο (panel). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η βασική δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και πολλά πλαίσια μπορούν να ενωθούν, ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό ηλεκτρικό δυναμικό. Αυτή η δομή των πλαισίων είναι ένα πλεονέκτημα καθώς επιτυγχάνεται πάντα η παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά κελιά κατασκευάζονται από διάφορους ημιαγωγούς, που συνήθως είναι το πυρίτιο με μίξεις από θειούχο κάδμιο, θειούχο χαλκό και αρσενιούχο γάλλιο. Η ικανότητα μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι γύρω στο 15-20% [1].

4.3 Αιολική ενέργεια

Με τη χρήση ανεμογεννητριών μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης. Μικρές μονάδες αφαλάτωσης, που χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια έχουν στηθεί σε νησιά. Τα μειονεκτήματά της είναι οι εποχιακές διακυμάνσεις, οι οποίες την καθιστούν αναξιόπιστη για την σταθερή παροχή ενέργειας, άρα και νερού.

Οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται τον άνεμο και παράγουν μηχανική ενέργεια. Η θεωρητική μέγιστη ικανότητα αεροδυναμικής μετατροπής από άνεμο σε μηχανική ενέργεια είναι 59% [2]. Στην πράξη όμως ακόμα στις πιο προηγμένες τεχνολογικά ανεμογεννήτριες η μέγιστη τιμή της φτάνει στο 48% περίπου ή και ακόμα χαμηλότερα, λόγω απωλειών, αλλά και λόγω του γεγονότος πως η ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί πάντα στο ιδανικό σημείο απόδοσης. Επίσης όταν η ένταση του ανέμου είναι πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας. Στην πράξη μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί για εντάσεις ανέμου ανάμεσα σε 6,5 και 20 m/sec. Αν και είναι μια ώριμη τεχνολογία οι στρατηγικές νέου ελέγχου αλλά και τα βελτιωμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αυξήσουν την παραγωγή των ανεμογεννητριών.

4.4 Ο συνδυασμός της ηλιακής με την αιολική ενέργεια

Τα συμπληρωματικά χαρακτηριστικά του ανέμου και του ηλίου καθιστούν τη χρήση υβριδικών συστημάτων μια υποσχόμενη εναλλακτική. Καθώς η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ηλιόλουστης μέρας, η αιολική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις άλλες περιπτώσεις. Όπως είναι φυσικό, αφορά σε περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια, με επαρκές αιολικό δυναμικό, όπως είναι τα νησιά των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων.

4.5 Γεωθερμική ενέργεια

Υπάρχουν διαφορετικές πηγές γεωθερμικής ενέργειας. Αυτές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη μετρούμενη θερμοκρασία σε χαμηλές (κάτω των 100°C), σε μεσαίες (100-150°C) και σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 150°C). Η θερμική μεταβολή στη γη κυμαίνεται μεταξύ 15 και 75°C ανά χιλιόμετρο βάθους, ωστόσο η ροή θερμότητας διακυμαίνεται ανώμαλα σε διαφορετικές ηπειρωτικές περιοχές. Επιπλέον, υπάρχουν τοπικά κέντρα θερμότητας σε βάθος 6-10 χιλιομέτρων που δημιουργούνται λόγω της αποσύνθεσης ραδιενεργών στοιχείων. Η ενέργεια από τη γη συνήθως εξάγεται με εδαφικούς εναλλάκτες θερμότητας. Αυτοί κατασκευάζονται από ένα υλικό που είναι στέρεο, όμως επιτρέπει στη θερμότητα να διέλθει αποτελεσματικά. Οι κατασκευαστές υπόγειων εναλλακτών θερμότητας συνήθως χρησιμοποιούν υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο που είναι ένα ανθεκτικό πλαστικό με θερμικές συγκολλήσεις, γεγονός που του εξασφαλίζει ζωή τουλάχιστον 50 ετών. [3]

4.6 Άλλες χρησιμοποιούμενες ΑΠΕ

Η χρήση της βιομάζας έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια και αποτελεί έναν χαμηλών ρύπων τρόπου παραγωγής ενέργειας. Παρόλα αυτά ο συνδυασμός της με την αφαλάτωση δεν είναι μια υποσχόμενη εναλλακτική καθώς τα οργανικά υπολείμματα δεν είναι συνήθως διαθέσιμα σε άγονες περιοχές και η ανάπτυξη της βιομάζας απαιτεί περισσότερο φρέσκο νερό από όσο πιθανώς να παράγει η μονάδα της αφαλάτωσης [4].

4.7 Συνδυασμοί αφαλάτωσης και ΑΠΕ

Ο συνδυασμός ΑΠΕ και συστημάτων αφαλάτωσης μπορεί να αποτελέσει λύση για παραγωγή φρέσκου νερού ακόμα και σε περιπτώσεις πολύ απομονωμένων περιοχών. Ειδικά για την Ελλάδα, μπορούν να επιτρέψουν σε περιοχές με πρόβλημα έλλειψης νερού όπως είναι τα ελληνικά νησιά να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό χωρίς επιπλέον ρύπανση της ατμόσφαιρας. Παράλληλα, το κόστος αφαλάτωσης με ΑΠΕ διαρκώς μειώνεται γεγονός που μπορεί να τις καταστήσει πιο ενδιαφέρουσες και από οικονομικής απόψεως.

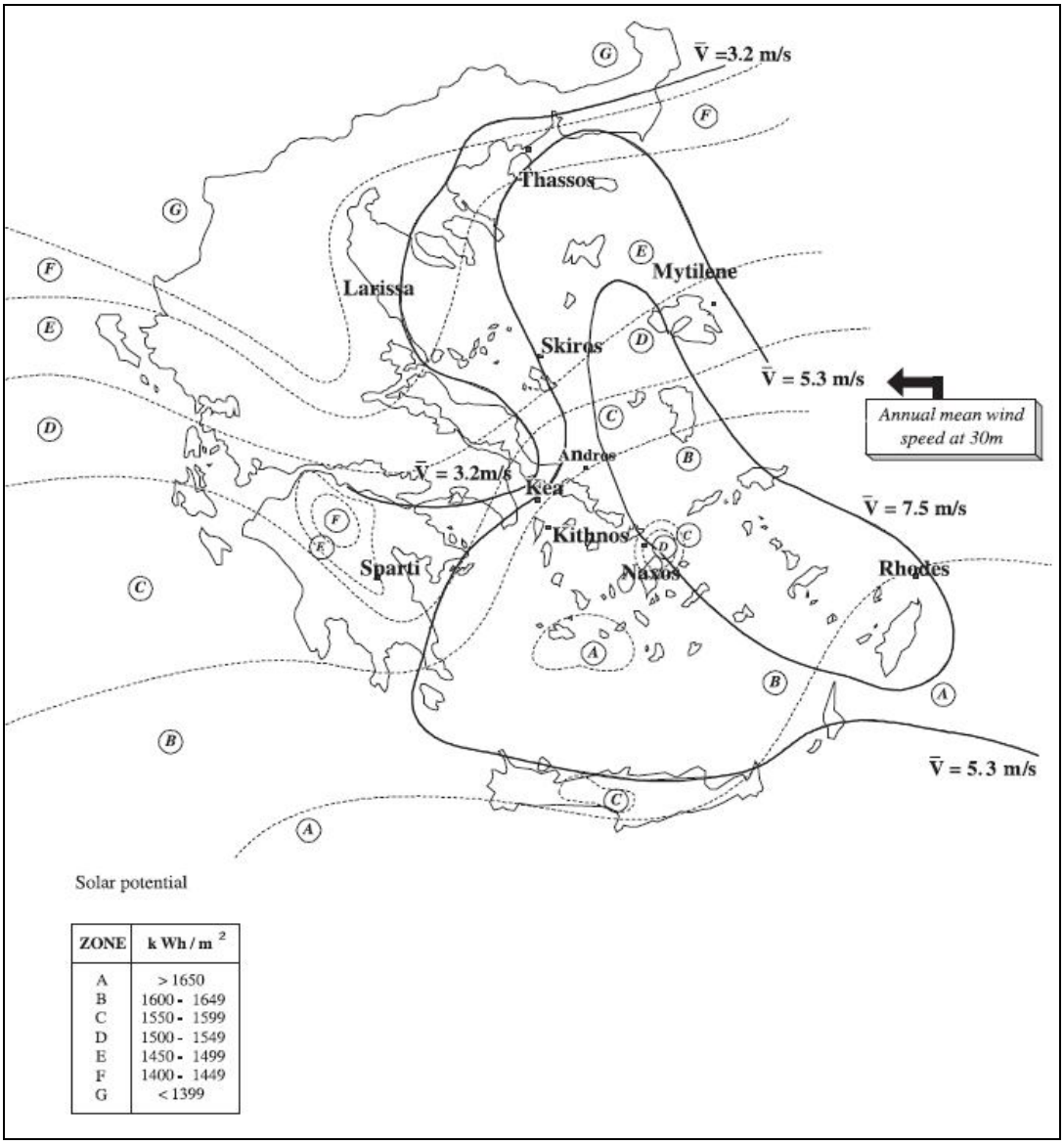
Όλες οι μέθοδοι αφαλάτωσης δεν είναι δυνατό να συνδυαστούν με όλες τις ΑΠΕ. Οι καλύτεροι συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αφαλατωμένου νερού φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης είναι η επικρατέστερη από τις μεθόδους αφαλάτωσης όταν συνδυάζονται με φιλικές προς το περιβάλλον μονάδες παραγωγής ενέργειας γεγονός που οφείλεται κυρίως στις χαμηλές ενεργειακές της απαιτήσεις σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης.

Πίνακας 4.1 Συνδυασμός ΑΠΕ και τεχνολογιών αφαλάτωσης

Τεχνολογία αφαλάτωσης	Τεχνολογία ΑΠΕ	Νερό τροφοδοσίας	Ποσοστό των εγκαταστάσεων
Αντίστροφη Ώσμωση (RO)	Φωβολταϊκά	Θαλασσινό Υφάλμυρο	62%
	Ανεμογεννήτριες	Θαλασσινό Υφάλμυρο	
Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (MED)	Ηλιακή θερμική Γεωθερμία	Θαλασσινό	14%
Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (MSF)	Ηλιακή θερμική	Θαλασσινό	10%
Ηλεκτροδιάλυση (ED)	Φωβολταϊκά	Υφάλμυρο	5%
Μηχανική επανασυμπίεση ατμών (MVC)	Ανεμογεννήτριες	Θαλασσινό	5%
Άλλες			4%

Πηγή: [5]

Τα ελληνικά νησιά έχουν ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φιλικής προς το περιβάλλον μορφής ενέργειας, ώστε να τροφοδοτηθούν τα συστήματα αφαλάτωσης νερού και να λυθεί έτσι σε σημαντικό βαθμό το πρόβλημα της έλλειψης φρέσκου νερού. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται το ηλιακό και αιολικό δυναμικό της χώρας μας.



ZONE	k Wh / m ^{2}
A	> 1650
B	1600 - 1649
C	1550 - 1599
D	1500 - 1549
E	1450 - 1499
F	1400 - 1449
G	< 1399

Εικόνα 4.1 Ηλιακό και αιολικό δυναμικό της Ελλάδας [6]

4.8 Βιβλιογραφία

1. Kagarakis, K., *Photovoltaic Technology (in greek).* 1992.
2. Kaldellis, J.K. and K.A. Kavadias, *Laboratory Applications of Soft Energy Sources (in greek).* 2001.
3. Kalogirou, S.A., *Seawater desalination using renewable energy sources.* Progress in Energy and Combustion Science, 2005. **31**(3): p. 242-281.
4. Rodriguez, L.G., *Renewable energy applications in desalination: state of the art.* Solar energy, 2003. **75**: p. 381-393.
5. Tzen, E. and R. Morris, *Renewable energy sources for desalination.* Solar energy, 2003. **75**: p. 375-379.
6. Kaldellis, J.K., K.A. Kavadias, and P.S. Koronakis, *Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2005: p. 1-21.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟ ΧΩΡΟ: ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Στα νησιά του Αιγαίου συναντάται το τυπικό μεσογειακό ξηρό κλίμα. Στην πλειοψηφία τους έχουν περιορισμένους υδάτινους πόρους, ιδιαίτερα όσον αφορά στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα. Επιπλέον, η είσοδος του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο την εξεύρεση πόσιμου νερού. Ως αποτέλεσμα, τα αποθέματα υδάτινων πόρων δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του τοπικού πληθυσμού. Το πρόβλημα γίνεται ακόμη μεγαλύτερο κατα τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όταν και οι ανάγκες για πόσιμο νερό αυξάνουν εως και πέντε φορές πάνω από το κανονικό. Μέχρι σήμερα, η έλλειψη αυτή αντιμετωπιζόταν με τη μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία με υψηλό κόστος που κυμαινόταν από 5-8 €/m^3 [1].
Τα νησιά με το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι κυρίως οι Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα. Τα πιο μεγάλα από τα νησιά των Κυκλάδων είναι η Πάρος, η Σύρος, η Τήνος, η Μύκονος, η Σαντορίνη και η Μήλος. Αντίστοιχα, η Σύμη, η Πάτμος, η Χάλκη, η Λέρος και οι Λειψοί είναι τα νησιά των Δωδεκανήσων με τη σημαντικότερη έλλειψη σε πόσιμο νερό.

5.2 Η έλλειψη νερού στα Ελληνικά νησιά

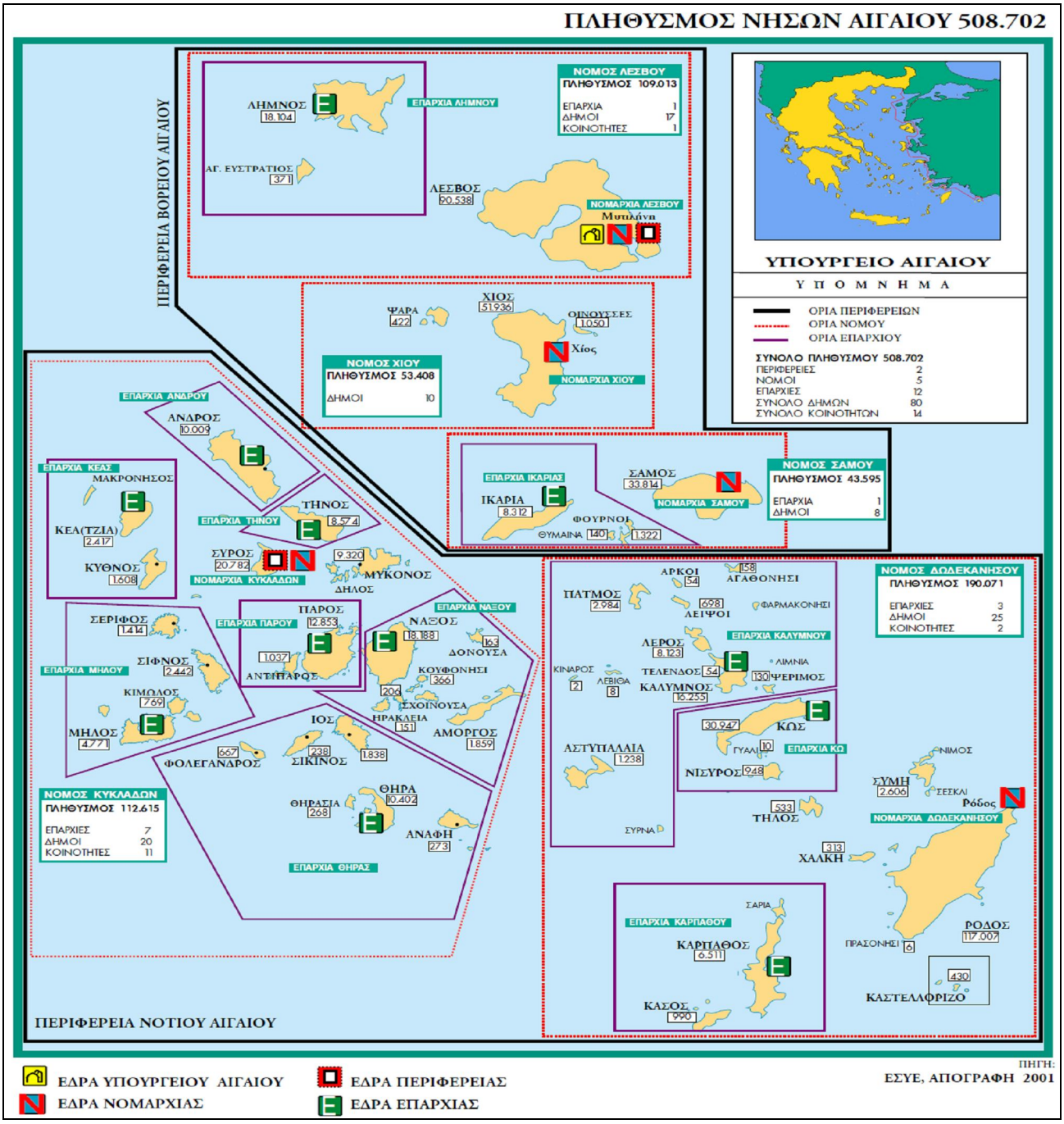
Τα ελληνικά νησιά θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μέσο ημερήσιο έλλειμμά τους σε νερό [2]:

- Η πρώτη καρηγορία περιλαμβάνει νησιά με μέσο ημερήσιο έλλειμμα σε νησιά ανάμεσα σε 1.000 και 2500 m^3. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα Κουφονήσια, η Κίμωλος, η Τήνος, η Μήλος, οι Λειψοί, η Μεγίστη, η Νίσυρος, η Πάτμος, η Σύμη και η Χάλκη.
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει νησιά με μέσο ημερήσιο καλοκαιρινό έλλειμμα της τάξης των 100 με 250 m^3. Τα νησιά αυτά είναι η Αμοργός, η Ηρακλειά, η Σχοινούσα, η Φολέγανδρος, η Σίκινος, η Θηρασιά και το Αγαθονήσι.
- Τέλος στην τρίτη κατηγορία θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν η Δονούσα, η Παλιόνησος και η Ψέριμος και αφορά σε νησιά με μέσο καλοκαιρινό ημερήσιο έλλειμμα νερού μικρότερο από 100 m^3 πόσιμου νερού.

Πολλές μελέτες έχουν γίνει και πολλές προτάσεις έχουν διατυπωθεί σχετικά με το πρόβλημα της έλλειψης νερού. Οι κύριες προτασεις περιλαμβάνουν [2]:

- Μεταφορά νερού από άλλα γειτονικά νησιά ή από την ηπειρωτική χώρα
- Εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης νερού
- Κατασκευή ταμιευτήρων νερού (όπως αυτοί στην Μύκονο, και στην Αστυπάλαια), που με πολύ μικρό λειτουργικό κόστος αποτελούν μια μακροπρόθεσμη λύση για το πρόβλημα της έλλειψης νερού
- Κατασκευή νέων φραγμάτων και τέλος
- Η βελτίωση των υποδομών των νησιών, όπως η συντήρηση του δικτύου παροχής νερού,ώστε να μειωθούν οι απώλειες σε νερό

Από όλες αυτές τις εναλλακτικές, η μεταφορά του νερού και η κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης αποτελούν τις πιο δημοφιλείς λύσεις. Στην εικόνα 5.1 απεικονίζονται τόσο τα νησιά του Αιγαίου καθώς και ο πληθυσμός τους.



Εικόνα 5.1 Χάρτης νησιών Αιγαίου και ο πληθυσμός τους

5.3 Μεταφορά νερού

Σήμερα, μεταφορά του νερού γίνεται σε εικοσιδύο νησιά των Κυκλάδων και Δωδεκανήσων. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται επίσημα στοιχεία του Υπουργείου Αιγαίου για τις μεταφερόμενες ποσότητες στα προαναφερθέντα νησιά για το 2006, ενώ στον Πίνακα 5.2 φαίνεται διαχρονικά η μεταφερόμενη ποσότητα για τις χρονιές 1997-2006, όπως επίσης και το συνολικό κόστος μεταφοράς για την αντίστοιχη περίοδο.

Πίνακας 5.1 Μεταφερόμενες ποσότητες νερού σε άνυδρα νησιά για το 2006

Νησιά	**Ποσότητες νερού (σε m³/ έτος)**	**Μόνιμοι κάτοικοι***
Αμοργός	25.024	1.859
Κουφονήσια	44.983	366
Κίμωλος	39.949	769
Ηρακλειά	16.818	151
Σχοινούσα	31.047	206
Φολέγανδρος	60.153	667
Τήνος	14.571	8.574
Σίκινος	17.084	238
Θηρασιά	12.729	268
Δονούσα	ΝΑ	163
Μήλος	298.040	4.771
Σύνολο	**567.719**	**9.458**
Δωδεκάνησα		
Αγαθονήσι	21.896	158
Λειψοί	33.907	698
Μεγίστη	71.489	509

* Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών η ζήτηση σε νερό αυξάνει κατά 4-5 φορές λόγω του εγχώριου και διεθνούς τουρισμού.

Νίσυρος	25.749	948
Πάτμος	258.172	2.984
Σύμη	457.142	2.606
Χάλκη	67.833	313
Παληόνησος	570	
Ψέριμος	650	130
Λέβιθα	430	8
Λέρος	67.500	8.123
Σύνολο	**1.005.338**	**15.960**

Πήγή: Υπουργείο Αιγαίου

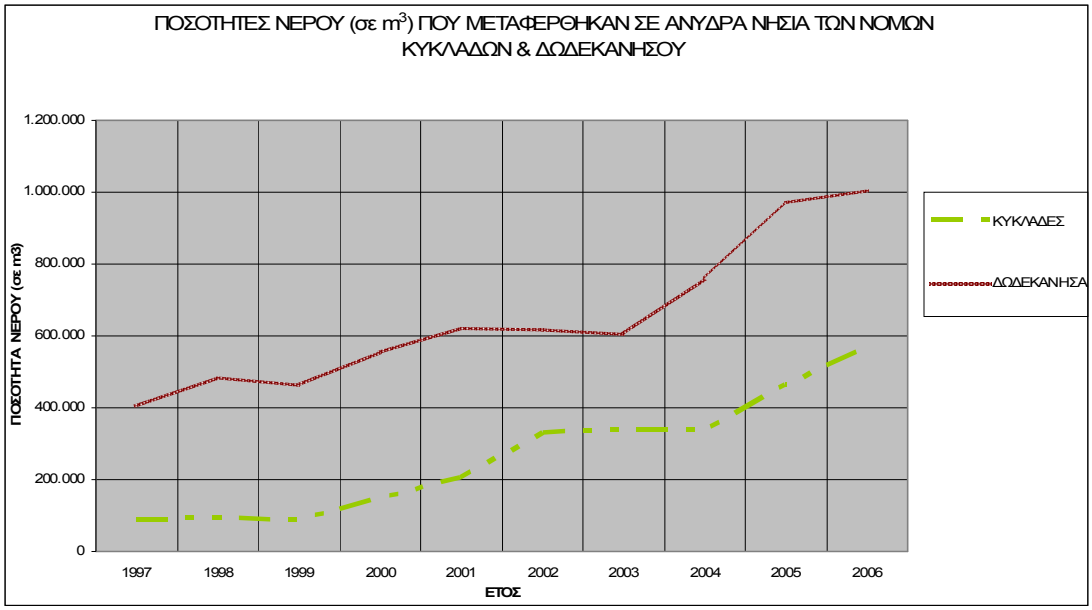
Πίνακας 5.2 Ποσότητες και κόστος μεταφορά νερού

	Κυκλάδες		Δωδεκάνησα	
Έτος	Ποσότητες (σε m^3)	Κόστος (σε €)	Ποσότητες (σε m^3)	Κόστος (σε €)
1997	86.525	311.078	402.295	933.802
1998	91.050	650.755	484.994	1.312.419
1999	87.760	672.712	461.855	1.407.916
2000	145.570	1.158.370	555.212	2.004.234
2001	203.792	1.625.093	621.297	2.722.540
2002	329.343	2.561.278	617.745	3.109.358
2003	336.777	2.772.718	605.019	3.214.680
2004	338.812	2.787.235	759.737	4.034.203
2005	464.562	4.006.916	969.676	5.082.935
2006	567.719	4.677.686	1.005.338	4.905.044

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου

Υπάρχει μια πολύ σημαντική αύξηση των μεταφερόμενων ποσοτήτων από 500.000 m^3 το 1997 σε σχεδόν 1.600.000 m^3 το 2006. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως οι μεταφερόμενες ποσότητες κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών αφορούν τουλάχιστον τη μισή ετήσια ζήτηση. Το Διάγραμμα 5.1 δείχνει ακόμα πιο ξεκάθαρα τόσο την διαχρονική αύξηση

των μεταφερόμενων ποσοτήτων όσο και τον κατά νομό διαχωρισμό. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται καθαρά πως στη δεκαετία 1997-2006, το πρόβλημα στις Κυκλάδες οξύνθηκε σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τα Δωδεκάνησα, καθώς λόγω κυρίως της αύξησης του τουρισμού παρατηρήθηκε αύξηση των μεταφερόμενων ποσοτήτων κατά σχεδόν 6,5 φορές έναντι περίπου 2,5 φορές που ήταν στα Δωδεκάνησα.



Διάγραμμα 5.1 Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν σε άνυδρα νησιά των Κυκλάδων και Δωδεκανήσων

5.4 Το κόστος της μεταφοράς νερού

Η μεταφορά νερού έχει προσωρινό χαρακτήρα αφού αποτελεί μια μάλλον ακριβή λύση. Προς το παρόν αποτελεί όμως τη μόνη λύση που έχει υιοθετηθεί για κάποια άνυδρα νησιά παρά τα όποια μειονεκτήματά της. Πιο συγκεκριμένα, το Υπουργείο Αιγαίου επιδοτεί τη μεταφορά νερού δαπανώντας πολύ σημαντικά ποσά στη δραστηριότητα αυτή. Το 2006, το κόστος για τις συνολικά μεταφερόμενες ποσότητες στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα έφτασε το συνολικό ποσό των 9,5 εκατομμυρίων ευρώ. Ποσό,

το οποίο συγκρινόμενο με τα περίπου 1,2 εκατ. ευρώ που δαπανήθηκαν το 1997 απεικονίζει τόσο την αύξηση των μεταφερόμενων ποσοτήτων όσο και αυτή του κόστους μεταφοράς.

Η διαχρονική εξέλιξη του ανα κυβικό μεταφορικού κόστους του νερού φαίνεται στον Πίνακα 5.3. Εΐναι προφανής η αύξηση του κόστους του νερού με τη χρησιμοποίηση υδροφόρων πλοίων καθώς από 3,60 €/m^3 και 2,32 €/m^3 που κόστιζε το 1996 στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα, έφτασε να κοστίζει το 2006 πάνω από 8 €/m^3 και γύρω στα 5 €/m^3 αντίστοιχα. Η διαφορά στις δυο αυτές τιμές αποδίδεται στο γεγονός πως στις Κυκλάδες το νερό μεταφέρεται από την Αθήνα (ΕΥΔΑΠ), ενώ στα Δωδεκάνησα η μεταφορά γίνεται από τη Ρόδο, το μεγαλύτερο νησί των Δωδεκανήσων.

Πίνακας 5.3 Διαχρονική εξέλιξη του κόστους μεταφοράς νερού

	Κυκλάδες	Δωδεκάνησα
Έτος	Κόστος (σε €/m^3)	Κόστος (σε €/m^3)
1997	3,60	2,32
1998	7,15	2,71
1999	7,67	3,05
2000	7,96	3,61
2001	7,97	4,38
2002	7,78	5,03
2003	8,23	5,31
2004	8,23	5,31
2005	8,63	5,24
2006	8,24	4,88

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου

Καθίσταται λοιπόν σαφές πως η μεταφορά του νερού αποτελεί μια δαπανηρή λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού. Επιπλέον, το παραπάνω κόστος δεν φτάνει στον τελικό καταναλωτή αφού οι τιμές που αυτός πληρώνει είναι διαμορφώνονται σε χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς, η λύση της

μεταφοράς του νερού έχει ουσιαστικά ένα σημαντικό κοινωνικό κόστος και αποτελεί λύση προσωρινού μόνο χαρακτήρα.

5.5 Αφαλάτωση νερού

Μια εναλλακτική λύση στη μεταφορά νερού είναι η τοποθέτηση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης νερού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι μέθοδοι αφαλάτωσης χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: Στις θερμικές και στις μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες με πιο σημαντική εκπρόσωπο την αντίστροφη ώσμωση. Η τελευταία, λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων της σε ενέργεια είναι και η επικρατούσα τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως και η μοναδική χρησιμοποιούμενη μέθοδος αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά. Στον Πίνακα 5.4 φαίνονται όλες οι υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά.

Πίνακας 5.4 Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης σε Κυκλάδες και Δωδεκάνησα

Κυκλάδες	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m^3/μέρα)	Έτος εγκατάστασης
Σύρος	Άνω Σύρος	120	1993
		250	2000
		500	2002
	Ερμούπολη	800	1992
		800	1997
		250 (2 μονάδες)	2001
		800 (4 μονάδες)	2002
	Ποσειδωνία	750 (3 μονάδες)	2002
Ίος	Μυλοπότας	1000	2001

Μύκονος	Κόρφος	1200 (2 μονάδες) 2250 (3 μονάδες)	1989 2001
Πάρος	Νάουσα	1200	2002
Σίφνος	Καμάρες	500	2001
Τήνος	Τήνος	500	2001
Σαντορίνη	Οία	380	1995
Δωδεκάνησα			
Μεγίστη	Μεγίστη	50	1990
Νίσυρος	Νίσυρος	300 350	1991 2002

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου

5.6 Το κόστος της αφαλάτωσης στην Ελλάδα

Η αφαλάτωση είναι μια ενεργοβόρος μέθοδος παραγωγής φρέσκου νερού. Το τελικό κόστος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το είδος της χρησιμοποούμενης ενέργειας. Είναι σαφές πως σε περιπτώσεις που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την κύρια πηγή παροχής ενέργειας, το κόστος της αφαλάτωσης είναι πολλαπλάσιο. Για να υπολογίσουμε το κόστος για μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας, εξετάστηκε η περίπτωση του νησιού της Μήλου.

5.6.1 Εξέταση της περίπτωσης της Μήλου

Η Μήλος αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα νησιά των Κυκλάδων, με περίπου 5.000 μόνιμους κατοίκους. Κάθε χρόνο σημαντικές ποσότητες νερού μεταφέρονται στο νησί προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε φρέσκο, πόσιμο νερό. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι μεταφερόμενες ποσότητες

νερού ανα τρίμηνο για τις χρονιές 2002-2006. Αξίζει να σημειωθεί πως η μεταφορά νερού στο νησί ξεκίνησε το 2001, όταν μια σχετικά μικρή ποσότητα νερού μεταφέρθηκε στο νησί προκειμένου να καλυφθεί το έλλειμμα προσφερόμενου νερού (περίπου 27.000 m^3). Τα χρόνια που ακολούθησαν οι μεταφερθείσες ποσότητες πολλαπλασιάστηκαν, φτάνοντας το 2006 τις σχεδόν 300.000 m^3.

Πίνακας 5.5 Μέσες ημερήσιες μεταφερθείσες ποσότητες νερού στη νήσο Μήλο (σε m^3)

	2002	2003	2004	2005	2006
1ο τρίμηνο	437	318	204	301	563
2ο τρίμηνο	491	571	510	806	1027
3ο τρίμηνο	651	733	615	896	964
4ο τρίμηνο	490	396	415	543	709
Σύνολο έτους	189.090	184.482	159.800	232.778	298.040

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου

Με βάση και το ετήσιο έλλειμμα του νησιού που το 2006 έφτασε στις 300.000 m^3, μια μονάδα αφαλάτωσης ημερήσιας δυναμικότητας 1.000 m^3 φαίνεται πως θα κάλυπτε ιδανικά το έλλειμμα σε φρέσκο νερό.

5.7 Υπολογισμός κόστους αφαλάτωσης νερού

Το κόστος της αφαλάτωσης περιλαμβάνει το κόστος του παραγόμενου νερού, το κόστος της διανομής και τέλος το κόστος αποθήκευσης. Η μέθοδος αφαλάτωσης δεν επηρεάζει ούτε το κόστος διανομής, ούτε της αποθήκευσης αλλά μόνο το κόστος παραγωγής. Το τελευταίο, γενικά περιλαμβάνει το κόστος εργασίας, την ενέργεια, το πάγιο κεφάλαιο και τα αναλώσιμα. Το ύψος του καθορίζεται κυρίως από το κόστος της ενέργειας και το απαιτούμενο πάγιο κεφάλαιο.

Το κόστος μιας νέας εγκατάστασης αφαλάτωσης ανά μονάδα παραγόμενου νερού (σε €/m³) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη ταξινόμηση:

1. Κόστος απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου
2. Ετήσιο λειτουργικό κόστος

Το κόστος του απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου περιλαμβάνει:

- Κόστος γης
- Κόστος κτισμάτων και έργων υποδομής
- Κόστος τροφοδοσίας της μονάδας με νερό (σωληνώσεις, γεωτρήσεις, κλπ)
- Κόστος σύνδεσης με το δίκτυο παροχής ρεύματος
- Κόστος μονάδας αφαλάτωσης (αντλίες, μεμβράνες, λοιπά εξαρτήματα)
- Δεξαμενές νερού

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει:

- Εργασία
- Κόστος λειτουργίας (χημικά, φίλτρα, λοιπά)
- Κόστος ενέργειας (από το δίκτυο ή άλλες συμβατικές πηγές)
- Κόστος συντήρησης
- Κόστος ασφάλισης

Δεδομένου του χρόνου ζωής του κάθε «συστατικού» της εγκατάστασης και του επιτοκίου της αγοράς, χρησιμοποιώντας τον τύπο του ετήσιου ισοδύναμου μπορούμε να υπολογίσουμε το ετήσιο ισοδύναμο κόστος της εγκατάστασης. Γνωρίζοντας τη διάρκεια ζωής μιας επένδυσης (ν χρόνια) και το ετήσιο επιτόκιο (ι) τότε το ετήσιο ισοδύναμο κόστος της επένδυσης (ΕΙΚ) με δεδομένη την παρούσα αξία της (ΠΑ) είναι:

$$\text{ΕΙΚ} = \frac{\text{ΠΑ} \bullet \iota}{1 - (1 + \iota)^{-\nu}}$$

Στην περίπτωση της Μήλου, θεωρούμε ότι το νερό που πρόκειται να αφαλατωθεί προέρχεται από γεώτρηση και είναι υφάλμυρο. Οι υπολογισμοί που γίνονται παρακάτω βασίζονται στην υπόθεση πως μια γεώτρηση 100 μέτρων θα μας δώσει τις απαραίτητες ποσότητες υφάλμυρου νερού. Το κόστος γεώτρησης για κάθε μέτρο βάθους είναι περίπου 100 €. Το κόστος του απαραίτητου κτιρίου, το οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι ένα λυόμενο που θα στεγάσει τη μονάδα της αφαλάτωσης και βοηθητικούς χώρους, υπολογίστηκε στις 32.000€. Μια μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας 1000 m^3/ημέρα και για υφάλμυρο νερό έχει κόστος γύρω στις 250.000€, ενώ για την εγκατάσταση και λοιπά έξοδα απαιτούνται επιπλέον 50.000€. Στον Πίνακα 5.6 δίνεται η σχετική ανάλυση κόστους για τη μονάδα αφαλάτωσης ση Μήλο. Αξίζει να σημειωθεί πως η οικονομική ζωή του συστήματος αφαλάτωσης προσδιορίζεται στα 20 έτη και το χρησιμοποιούμενο επιτόκιο είναι 5%.

Πίνακας 5.6 Ανάλυση κόστους εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης

Επένδυση	**Κόστος (€)**	**Απόσβεση (€)**	**Βιβλιογραφία**
Γεώτρηση	10.000	802,4	[3]
Κτηριακή εγκατάσταση	32.000	2.567,8	[3]
Έξοδα εξοπλισμού αφαλάτωσης, εγκατάστασης κλπ.	300.000	24.072,8	[3]
Συνολικό κόστος επένδυσης	**342.000**	**27.443**	

Τα κυριότερα λειτουργικά έξοδα περιλαμβάνουν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, την αντικατάσταση των μεμβρανών, τα χημικά για την προκατεργασία και την μετακατεργασία του νερού ώστε να καταστεί ασφαλές, τα έξοδα απασχόλησης εργατικού δυναμικού και λοιπά έξοδα. Στον Πίνακα 5.7 συνοψίζονται τα τα λειτουργικά κόστη και υπολογίζεται το

τελικό κόστος αφαλάτωσης νερού. Αξίζει να σημειωθεί πως η ετήσια ονομαστική δυναμικότητα του συστήματος αφαλάτωσης είναι 365.000 m^3 Παρόλα αυτά, το επίπεδο αυτό παραγωγής είναι πρακτικά αδύνατο. Μια ρεαλιστική προσέγγιση θα ήταν να υποθέσουμε πως για λόγους βλαβών, συντήρησης κλπ., η διαθεσιμότητα της μονάδας αφαλάτωσης είναι 85%, ήτοι ετήσια παραγωγή 310.000 m^3. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος παραγωγής του νερού φτάνει τα 0,79 €/ m^3.

Πίνακας 5.7 Υπολογισμός κόστους νερού αφαλάτωσης (σε €/έτος)

Λειτουργικά έξοδα	
1) Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	85,000
2) Κόστος εργατικών	78,000
3) Κόστος χημικών	20,000
4) Κόστος μεμβρανών	20,000
5) Λοιπά έξοδα	15,000
Σύνολο λειτουργικών εξόδων	218,000
Αποσβέσεις	27,443
Συνολικό ετήσιο κόστος	245,443
Ετήσια παραγωγή νερού (σε m^3)	310,000
Κόστος νερού αφαλάτωσης (σε €/m^3)	**0.79**

Το κόστος της αφαλάτωσης μπορεί να αυξηθεί μελλοντικά με ρυθμό μεγαλύτερο του πληθωρισμού, λόγω αύξησης του κόστους των εργατικών ή του κόστους παραγωγής του ηλεκτρικού. Επιπρόσθετα, το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού, μπορεί στην πράξη να αποδειχτεί υψηλότερο από τις αρχικές προβλέψεις. Γι' αυτόν τον λόγο, υπολογίστηκε ένα απαισιόδοξο σενάριο βασισμένο σε αυξημένο κόστος εγκατάστασης, εργασίας και ηλεκτρικής ενέργειας κατά 50%. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως, το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού με χρησιμοποίηση μονάδας αφαλάτωσης δεν υπερβαίνει τα 1,1 €/m^3.

5.8 Συμπεράσματα

Καθίσταται σαφές πως η μεταφορά του νερού δε θα μπορούσε να αποτελέσει μια μόνιμη λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού. Αντιθέτως, η αφαλάτωση μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της υδροδότησης των νησιών των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων, καθώς προσφέρει σημαντικές ποσότητες σε πολύ χαμηλότερο κόστος από αυτό της μεταφοράς με υδροφόρες. Το κόστος της αφαλάτωσης δεν είναι το ίδιο σε κάθε νησί και εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα του παρεχόμενου για αφαλάτωση νερού, τις ειδικές συνθήκες και τον πληθυσμό του κάθε νησιού. Σήμερα έχουν εγκατασταθεί πολλές μονάδες αφαλάτωσης κυρίως στα νησιά του Αιγαίου.

Ένα τυπικό νησί των Κυκλάδων, η Μήλος, χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί το κόστος του αφαλατωμένου νερού σε ποσότητα ικανή να καλύψει τις ανάγκες του νησιού. Μεγάλες ποσότητες νερού μεταφέρονται στο νησί κάθε χρόνο με κόστος που ξεπερνάει τα 8 €/ m^3 και αυτό το κόστος αυξάνεται συνεχώς λόγω των αυξήσεων στα καύσιμα κ.α. Έπειτα από συνεκτίμηση όλων των στοιχείων κόστους για την εγκατάσταση και λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης υπολογίστηκε ότι το κόστος αφαλάτωσης για το υφάλμυρο νερό μπορεί να είναι της τάξης των 0,79€/m^3. Αυτό το κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος μεταφοράς νερού, δείχνοντας πως το μέλλον της υδροδότησης των άνυδρων νησιών μπορεί να είναι η αφαλάτωση.

5.9 Βιβλιογραφία

1. Ministry of the Aegean: www.ypai.gr, Private communication
2. J.K. Kaldellis, K.A. Kavadias and E. Kondili, Renewable energy desalination plants for the Greek islands — technical and economic considerations. Desalination, 170 (2004) 187–203.
3. TEMAK S.A, N. Halkidona, Athens, Greece, Private Communication

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

6.1 Εισαγωγή

Καθώς οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι εξαντλούνται, όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον εμφανίζεται για την αφαλάτωση υφάλμυρων και θαλασσινών διαλυμάτων. Στη σημερινή εποχή, οι υπάρχουσες μέθοδοι αφαλάτωσης είναι ενεργοβόρες, γεγονός που κοστίζει τόσο από οικονομικής όσο και περιβαλλοντικής απόψεως. Πολλές μελέτες έχουν εμφανιστεί σε έντυπα σχετικά με αφαλάτωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στις εκτιμήσεις που γίνονται σε αυτές σημαντικό ρόλο φαίνεται να έχουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας καθώς για παρόμοιες εγκαταστάσεις παρατηρείται διαφορά στο κόστος του παραγόμενου νερού. Η διαφορά αυτή υφίσταται επειδή το κόστος του νερού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι η μέθοδος αφαλάτωσης, το επίπεδο της αλατότητας του διαλύματος που πρόκειται να αφαλατωθεί, το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται, το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης και άλλοι παράγοντες σχετιζόμενοι με την τοποθεσία εγκατάστασης.

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται η ταξινόμηση ενός μεγάλου αριθμού σχετικών δημοσιεύσεων, καταχωρισμένων με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπουν τόσο τη σύγκρισή τους, όσο και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Σχεδόν εκατό διαφορετικές περιπτώσεις εξετάστηκαν και ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του νερού τροφοδοσίας, τη μέθοδο αφαλάτωσης και την προέλευση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές και συμβατικές μορφές ενέργειας). Επιπλέον, εξετάστηκαν και κάποια υβριδικά συστήματα. Αξίζει να σημειωθεί πως στη βιβλιογραφία, ο υπολογισμός του κόστους αφαλάτωσης νερού βασίζεται σε

διαφορετικά δεδομένα. Παρατηρείται για παράδειγμα διαφορά στα επίπεδα των επιτοκίων αλλά και στον αριθμό ετών στον οποίο αποσβένεται ο εξοπλισμός, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις κόστη που μπορεί να θεωρούνται από τους συγγραφείς μικρά, ή χωρίς ιδιαίτερη σημασία παραλήφθησαν.
Στη συνέχεια περιγράφονται τα κόστη του αφαλατωμένου νερού όταν τα συστήματα χωρίζονται ανάλογα με το νερό τροφοδοσίας που χρησιμοποιούν, την προέλευση της ενέργειας, τη μέθοδο αφαλάτωσης και το αν είναι υβριδικά ή συμβατικά.

6.2 Κόστος αφαλάτωσης νερού με διαφορετικά επίπεδα αλατότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το νερό τροφοδοσίας ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε ολικά διαλυτά στερεά μπορεί να χωριστεί σε υφάλμυρο και θαλασσινό. Υφάλμυρο θεωρείται το νερό στο οποίο τα ολικά διαλυτά στερεά είναι μέχρι 10.000 ppm, ενώ το θαλασσινό νερό περιέχει από 10.000 μέχρι και περίπου 42.000 ppm. Σε περιπτώσεις που το νερό προς αφαλάτωση είναι υφάλμυρο το κόστος παραγωγής είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που θα είχε ένα ίδιο σύστημα που θα τροφοδοτείτο με θαλασσινό νερό. Λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας σε ολικά διαλυτά στερεά του υφάλμυρου νερού, το κόστος παραγωγής είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που θα είχε ένα ίδιο σύστημα που θα τροφοδοτούταν με θαλασσινό νερό. Ο κύριος λόγος είναι ότι η κατανάλωση ρεύματος είναι μικρότερη, όπως επίσης και το κόστος συντήρησης, π.χ. έχουμε αραιότερη αντικατάσταση των μεμβρανών σε μονάδες αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση.
Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Αμερικανικού Κονγκρέσου (1988), για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού σε μια μόνάδα αντίστροφης ώσμωσης το

κόστος κυμαίνεται μεταξύ 0,26€[1] (0,32$) και 0,35€ (0,44$) ανα m^3 και για το θαλασσινό νερό που μπορεί να περιέχει ακόμα και δέκα φορές περισσότερα ολικά διαλυτά στερεά, η αντίστροφη ώσμωση είχε κόστος αρχικά από 1,26€ (1,57$) έως 2,84€ (3,55$) ανα m^3, ενώ πιο πρόσφατες μελέτες δείχνουν πως το κόστος αυτό έχει μειωθεί σε 0,18€ (0,22$) μέχρι 0,22€ (0,28$) ανα m^3. Άλλες εκτιμήσεις δίνουν κόστη για το υφάλμυρο νερό μεταξύ 0.06€ (0,07$) και 0,07€ (0,08$) ανα m^3 και για το θαλασσινό νερό από 0,40€ (0,50$) μέχρι 0,56€ (0,70$) συμπεριλαμβανομένου του κόστους εγκατάστασης και των λειτουργικών εξόδων [1].

Σύμφωνα με την Αμερικανική Ένωση για την Τεχνολογία Μεμβρανών [2], το κόστος αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού κυμαίνεται ανάμεσα σε 0,30€ (0,38$) και 0,60€ (0,75$) ανα m^3 ενώ για το θαλασσινό νερό το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 0,60€ (0,75$) και 1,60€ (2,00$) ανα m^3. Η διαφορά ανάμεσα στην κατώτερη και στην ανώτερη τιμή αφορά σε οικονομίες κλίμακας που προκύπτουν από διαφορετική δυναμικότητα στις μονάδες αφαλάτωσης.

Από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

Για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού, η αντίστροφη ώσμωση είναι η μέθοδος που κυρίως χρησιμοποιείται καθώς είναι η πιο οικονομική. Παρόλα αυτά, κάποιες φορές χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι όπως για παράδειγμα μια μονάδα αφαλάτωσης Πολυβάθμιας Εκρηκτικής Εξάτμισης στη νήσο Κίμωλο, η οποία εκμεταλλευόμενη τη γεωθερμία του νησιού παράγει 80 m^3 φρέσκο νερό την ημέρα με ένα κόστος περίπου 2€/m^3 [3].

Το επίπεδο των ολικών διαλυτών στερεών του υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας που μπορεί να ποικίλουν από 2.000 ppm μέχρι και 10.000 ppm [4] επηρεάζει το κόστος παραγωγής νερού. Στην Ιορδανία η αφαλάτωση νερού με 2.300 ppm είχε κόστος 0,21€ (0,26$) /$m^3$ ενώ στη Φλόριντα των

[1] Ο υπολογισμός βασίζεται στην παραδοχή πως 1€ = 1,25$. Σε παρένθεση σημειώνονται οι τιμές σε δολάρια για τις βιβλιογραφικές αναφορές που γίνονται σε αυτό το νόμισμα. Οι τιμές δίνονται σε ευρώ για λόγους σύγκρισης.

ΗΠΑ για αφαλάτωση νερού 5.000 ppm το κόστος ήταν 0,22€ (0,27$) [5]. Από άλλη μελέτη [6] έχει φανεί πως δυο όμοια συστήματα που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό με διαφορετική συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών έχουν σημαντική διαφορά στο κόστος του παραγόμενου νερού. Στην περίπτωση που τα ολικά διαλυτά στερεά είναι 3.000 ppm το κόστος ανα m^3 ήταν της τάξης των 0,26€ (0,32$) ενώ για αφαλάτωση νερού με 10.000 ppm το κόστος έφτανε τα 0,43€ (0,54$) για κάθε m^3 παραγόμενου φρέσκου νερού.

Γενικά, το κόστος του υφάλμυρου νερού συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,21€ (0,26$) και 0,43€ (0,54$) ανά m^3 [5-8]. Σε περιπτώσεις μικρών σε μέγεθος μονάδων αφαλάτωσης το κόστος βέβαια είναι υψηλότερο. Οι Καραγιάννης και Σολδάτος [9] βρήκαν πως για μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού ημερήσιας δυναμικότητας 1.000 m^3 το κόστος έφτανε τα 0.79€/m^3. Άλλες εκτιμήσεις δείχνουν πως για μικρές μονάδες το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από 0,62€ (0,78$) μέχρι και 1,06€ (1,33$) [10-12]. Τέλος σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού έχει αναφερθεί κόστος που φτάνει τα 8,26€/m^3 (10,32$) [3].

Για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης συναντάται όλο και πιο συχνά τα τελευταία χρόνια καθώς οι απαιτήσεις της μεθόδου σε ενέργεια είναι οι χαμηλότερες αλλά και το κόστος των μεμβρανών βαίνει μειούμενο. Παρόλα αυτά, σε πολλές μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης σε χώρες όπως η Κίνα αλλά και σε αυτές της Μέσης Ανατολής που μπορούν να φτάσουν σε ημερήσια παραγωγή τους 500.000 τόνους φρέσκου νερού, χρησιμοποιούνται κυρίως οι θερμικές μέθοδοι. Στις περιπτώσεις αυτές το κόστος ποικίλει από 0,40€ (0,50$)/$m^3$ μέχρι και 0,80€ (1,00$)/$m^3$ [25,28,29,33-37].

Για μεσαίου μεγέθους συστήματα δυναμικότητας (12.000 – 60.000 m^3/μέρα) το κόστος παραγωγής του νερού έχει μεγαλύτερη διακύμανση, από 0,35€ (0,44$) /$m^3$ μέχρι 1,30€ (1,62$) /$m^3$ [5,6,24-32]. Για μικρού μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης με ημερήσια δυναμικότητα από 1.000 –

5.000 m^3 η αντίστροφη ώσμωση είναι η κυρίαρχη μέθοδος ειδικά στις πιο πρόσφατες εγκαταστάσεις και το κόστος της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού κυμαίνεται από 0,56€ (0,70$) /$m^3$ μέχρι και 3,15€ [3,5,19-23]. Τέλος για πολύ μικρές μονάδες αφαλάτωσης με δυναμικότητα από λίγα κυβικά μέτρα μέχρι 1.000 m^3, το κόστος είναι υψηλότερο (1,78 – 9,00 €/m^3). Στις πολύ μικρές μονάδες παρατηρείται αισθητά μεγαλύτερο κόστος λόγω χαμηλότερων οικονομιών κλίμακας αλλα και λόγω του ότι σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεών τους οι οποίες είναι πιο ακριβές από τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Κόστος αφαλάτωσης νερού για διαφορετικό νερό τροφοδοσίας

Νερό τροφοδοσίας	Μέγεθος μονάδας (m^3/μέρα)	Κόστος ανα m^3	Πηγή
Υφάλμυρο	<1.000	0,63€-1,06€ (0,78$-1,33$)	[9-12]
	5.000-60.000	0,21€-0,43€ (0,26$-0,54$)	[5-8]
Θαλασσινό	<1.000	1,78€-9,00€	[3,5,13-18]
	1.000-5.000	0,56€-3,15€	[3,5,19-23]
	12.000-60.000	0,35€-1,30€ (0,44$-1,62$)	[5,6,24-32]
	> 60.000	0,40€-0,80€ (0,50$-1,00$)	[25,28,29,33-37]

6.3 Κόστος αφαλάτωσης νερού και χρησιμοποιούμενη ενέργεια

Τα συστήματα αφαλάτωσης νερού με βάση το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: Σε αυτά που συνδέονται με συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας (ΔΕΗ, κλπ)και σε εκείνα που χρησιμοποιούν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, ηλιακοί συλλέκτες, γεωθερμία κλπ.)

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, το κόστος του παραγόμενου νερού από συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν κάποια συμβατική μορφή ενέργειας (πετρέλαιο, αέριο κλπ.) είναι αισθητά χαμηλότερο. Έτσι, για συστήματα που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό και συμβατικές μορφές ενέργειας έχει αναφερθεί κόστος από 0,21€ (0,26$) /$m^3$ μέχρι και 1,06€ (1,33$) /$m^3$ για μικρότερα συστήματα [5-8,10-12]. Αντίστοιχα, για συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται με θαλασσινό νερό το κόστος που έχει αναφερθεί για τις μεγαλύτερες μονάδες είναι 0,35€ (0,44$) /$m^3$ και φτάνει για τις μικρότερες τα 2,70€ /m^3 [5,6,13,16-18,20,23-32, 34-37,41,42].

Η αφαλάτωση με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), αντίθετα με τις συμβατικές μορφές ενέργειας μπορεί να αποτελέσει μια ελκυστική εναλλακτική λόγω των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς είναι φιλικές ως προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας και έχουν μειωμένες εκπομπές αερίων λόγω μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας κατά την χρήση τους. Η πλειονότητα των ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία μονάδων αφαλάτωσης μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- Σε αυτές που χρησιμοποιούν αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες)
- Σε αυτές που χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά, ηλιακοί συλλέκτες)
- Σε αυτές που χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια.

Τα συστήματα αφαλάτωσης με ΑΠΕ μπορεί να είναι εντελώς αυτόνομα, συνήθως με χρήση μπαταριών για να συσσωρεύουν το περίσσευμα ενέργειας και να το αποδίδουν όταν οι καιρικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές. Σε πολλές περιπτώσεις όμως είναι συνδεδεμένα με το υπάρχον δίκτυο ηλεκτροδότησης ώστε να μειώνονται οι διακυμάνσεις στην παραγωγή νερού λόγω της μεταβολής στο ρυθμό παραγωγής ενέργειας.

Ο Καλδέλλης [38] μελέτησε το κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού σε απομονωμένα νησιά τα οποία χρησιμοποιούν ΑΠΕ σε συνδυασμό με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Συμφωνα με τις εκτιμήσεις του το μέγιστο κόστος παραγωγής ήταν για τις μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις 2,5€/m^3 και για κάποια πολύ μικρά συστήματα ήταν υψηλότερο χώρις όμως να ξεπερνά τα 3,5€/m^3.

Τα απομονωμένα συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μικρό μέγεθος και το κόστος τους κυμαίνεται από 1€/m^3 [21] μέχρι και 5€/m^3 [3]. Έχει επισης αναφερθεί στη βιβλιογραφία σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ημερήσιας δυναμικότητας 52.500 m^3 το οποίο σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια παράγει φρέσκο νερό με κόστος κάτω από 1€/m^3 [39]. Για συστήματα αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες δυναμικότητας γύρω στα 1.000 m^3/ημέρα και διασυνδυδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρισμού, το κόστος κυμαίνεται ανάμεσα σε 1,40€/m^3 και 2,18€/m^3 [6,19,22]. Σε άλλη μελέτη παρουσιάστηκε σύστημα αφαλάτωσης το οποίο τροφοδοτούταν με ενέργεια που παραγόταν από ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη με το δίκτυο αλλά και με ντηζελογεννήτρια και παράγει νερό με κόστος 2,31€/m^3. Στην ίδια μελέτη, για μια μικρή μονάδα ημερήσιας δυναμικότητας 300 m^3, η οποία είναι συνδεδεμένη τόσο με μια ανεμογεννήτρια όσο και με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, υπολογίστηκε πως το κόστος παραγωγής για κάθε τόνο φρέσκου νερού είναι ανάμεσα σε 1,89€ και 2,76€ και όταν το ίδιο σύστημα συνδεθεί ταυτόχρονα και με ντηζελογεννήτρια τότε το τελικό κόστος διαμορφώνεται στα 2,23€/m^3 [16].

Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότηση των μονάδων αφαλάτωσης τότε οι εκτιμήσεις από τη βιβλιογραφία για το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού κυμαίνονται μεταξύ 3,14€/m^3 και 10,32€/m^3 [3,15,19]. Σε άλλες εργασίες [40] αναφέρεται πως το κόστος παραγωγής νερού για μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης συνδεδεμένη με φωτοβολταϊκά και ημερήσιας δυναμικότητας 5.000 m^3 είναι 1,60€/m^3 (2,00$/$m^3$) παρόμοια με αυτή ενός ηλιακού θερμικού συστήματος συνδυασμένη όμως όχι με σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης αλλά με μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της Εξάτμισης με Πολλαπλές Βαθμίδες. Το κόστος αυτό έχει επίσης υπολογιστεί πως είναι περίπου 2,5 φορές υψηλότερο από αυτό ενός συμβατικού συστήματος [40].

Επιπλέον έχουν αναφερθεί περιπτώσεις που για την παραγωγή φρέσκου νερού χρησιμοποιούν γεωθερμία ή σε κάποιες άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες. Ενδεικτικά αναφέρεται πως οσον αφορά σε συστήματα που χρησιμοποιούν γεωθερμία, για ένα σύστημα αφαλάτωσης στην Κίμωλο δυναμικότητας 80 m^3/ημέρα, το οποίο χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό για την τροφοδοσία του, υπολογίστηκε πως παράγει φρέσκο νερό με κόστος περίπου 2€/m^3 [3]. Σε περιπτώσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί ηλιακοί συλλέκτες για αφαλάτωση θαλασσινού νερού τότε έχει υπολογιστεί πως το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 3,5€/m^3 και 8€/m^3. Οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε πειραματικές εγκαταστάσεις και αφορούν σε μικρού μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης [3,14]. Στον Πίνακα 6.2 συνοψίζονται όλα τα παραπάνω στοιχεία κόστους.

Πίνακας 6.2 Κόστος παραγωγής νερού με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας

Νερό τροφοδοσίας	Ενεργειακό σύστημα	Κόστος ανα m^3	Πηγή
Υφάλμυρο	Συμβατικό	0,21€-1,06€ (0,26$-1,33$)	[5-8,10-12]
	Φωτοβολταϊκά	4,50€-10,32€	[3]
	Γεωθερμικό	2,00€	[3]
Θαλασσινό	Συμβατικό	0,35€-2,70€	[5,6,13,16-18,20,23-32, 34-37,41,42]
	Ανεμογεννήτρια	1,00€-5,00€	[3,16,19,21,22,39]
	Φωτοβολταϊκά	3,14€-9,00€	[15,19]
	Ηλιακοί συλλέκτες	3,50€-8,00€	[3,14]

6.4 Κόστος αφαλάτωσης νερού για διαφορετικές μεθόδους αφαλάτωσης

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: α) Σε μεθόδους αλλαγής φάσης ή θερμικές μεθόδους και β) σε μεθόδους μιας φάσης ή μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες. Οι πιο διαδεδομένες για την πρώτη κατηγορία είναι η Πολυβάθμια Εκρηκτική Εξάτμιση (MSF), η Εξάτμιση με Πολλαπλές Βαθμίδες (MED) και η Εξάτμιση με Επανασυμπίεση Ατμών (VC) ενώ για τη δεύτερη κατηγορία η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης (RO) συναντάται πιο συχνά από όλες τις μεθόδους μεμβρανών. Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται περισσότερο από αυτές των μεμβρανών όταν έχουμε να κάνουμε με νερό τροφοδοσίας υψηλής αλατότητας, όπως το θαλασσινό.

Εκτιμήσεις της χρονιάς 2000 έδιναν το κόστος της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση να κυμαίνεται μεταξύ 0,44€/m^3 (0,55$/$m^3$) και 2€/$m^3$ (2,50$/$m^3$) για μονάδες αφαλάτωσης ημερήσιας δυναμικότητας από 1.000 – 100.000 m^3. Αντίστοιχα για την ίδια περίοδο, όταν χρησιμοποιούνταν οι θερμικές μέθοδοι είχαν κόστος παραγωγής φρέσκου νερού από 0,56€/m^3 (0,70$/$m^3$) μέχρι 2€/$m^3$ (2,50$/$m^3$). Τα κόστη αυτά αναφέρονταν σε μονάδες ημερήσιας δυναμικότητας 10.000 – 100.000 m^3 [43].
Τέλος, εκτιμήσεις άλλων [40] έδιναν το κόστος για τις διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης ως ακολούθως:

- Για την MED: 0,88€/m^3 (1,10$/$m^3$) για μέγεθος 25.000 m^3/ημέρα
- Για την MSF: 0,64€/m^3 (0,80$/$m^3$) για μέγεθος 10.000 m^3/ημέρα
- Για την VC: 0,56€/m^3 (0,70$/$m^3$) για μέγεθος 3.000 m^3/ημέρα
- Για την RO: 0,56€/m^3 (0,70$/$m^3$) για μέγεθος 6.000 m^3/ημέρα

Οι θερμικές μέθοδοι είναι πιο ακριβές διότι απαιτούν μεγάλες ποσότητες καυσίμων για την εξάτμιση του νερού τροφοδοσίας και τελικά την αφαλάτωσή του και χρησιμοποιούνται κυρίως για μεγάλα συστήματα, ώστε να επιτευχθούν οικονομίες κλίμακας. Σε μικρές μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας δεν συναντώνται, και η επικρατέστερη μέθοδος αφαλάτωσης είναι αυτή της αντίστροφης ώσμωσης η οποία είναι πιο οικονομική. Από την άλλη, η αντίστροφη ώσμωση επειδή είναι μέθοδος που χρησιμοποιεί μεμβράνες και εξαιτίας του υψηλού κόστους αντικατάστασης των τελευταίων, είναι λιγότερο αποδοτική στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Παρόλα αυτά η τεχνολογία κατασκευής των μεμβρανών συνεχώς βελτιώνεται και το κόστος τους φθίνει με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε μεγαλύτερα συστήματα. Γενικά το κόστος της αφαλάτωσης τα τελευταία χρόνια βαίνει μειούμενο λόγω τεχνολογικής προόδου, η οποία έχει επιτρέψει τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, την εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων υλικών

αλλά και τη χρησιμοποίηση νεών τεχνικών, όπως τα υβριδικά συστήματα [2].

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τις θερμικές μεθόδους έχουν συνήθως μεγάλη παραγωγική ικανότητα. Στην περίπτωση της μεθόδου MSF, το κόστος για μεγάλα συστήματα με ημερήσια δυνατότητα παραγωγής από 91.000 m^3 μέχρι και 320.000 m^3 κυμαίνεται μεταξύ 0,42€/m^3 (0,52$/$m^3$) και 0,81€/$m^3$ (1,01$/$m^3$) [25,28,29,33-37]. Τα κόστη αυτά αναφέρονται σε μελέτες από το 1999 μέχρι και το 2006 με τις πιο πρόσφατες να έχουν το χαμηλότερο κόστος και τις παλαιότερες το υψηλότερο αντίστοιχα. Για μεσαίου μεγέθους συστήματα με ημερήσια δυναμικότητα παραγωγής από 12.000 m^3 μέχρι 55.000 m^3, το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 0,76€/m^3 (0,95$/$m^3$) και 1,2€/$m^3$ (1,50$/$m^3$) [25,27,28,31]. Επίσης, έχουν αναφερθεί και συστήματα ημερήσιας δυναμικότητας 100 m^3 και κόστος ανάμεσα σε 2,00 και 8,00€/m^3 [3,14].

Για τη μέθοδο της MED, δεν έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία συστήματα χαμηλής δυναμικότητας, με τα πιο μικρά να μπορούν να παράξουν 23.000 m^3/ημέρα. Επιπλέον, είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται στα μεγαλύτερα εργοστάσια αφαλάτωσης στον κόσμο με ημερήσια δυναμικότητα που ξεπερνά το μισό εκατομμύριο m^3 (528.000 m^3/ημέρα). Το κόστος δε του παραγόμενο νερού κυμαίνεται από 0,42€/m^3 (0,52$/$m^3$) έως και 1,40€/$m^3$ (1,75$/$m^3$) [5,27,30,32,34,36].

Η λιγότερο χρησιμοποιούμενη θερμική μέθοδος αφαλάτωσης είναι η VC, η οποία συναντάται σε συστήματα με δυναμικότητα γύρω στα 1.000 m^3/ημέρα και ένα κόστος ανάμεσα σε 1,61€/m^3 και 2,13€/m^3 [19,22]. Τα παραπάνω κόστη συνοψίζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 Θερμικές μέθοδοι και κόστος παραγωγής φρέσκου νερού

Μέθοδος αφαλάτωσης	Μέγεθος μονάδας (m^3/μέρα)	Κόστος ανα m^3	Πηγή
MSF	<100	2€-8€	[3,14]
	12.000-55.000	0,76€-1,20€ (0,95$-1,50$)	[25,27,28,31]
	>91.000	0,42€-0,81€ (0,52$-1,01$)	[25,28,29,33-37]
MED	23.000-528.000	0,42€-1,40€ (0,52$-1,75$)	[5,27,30,32,34,36]
VC	1.000-1.200	1,61€-2,13€	[19,22]

Η αντίστροφη ώσμωση είναι η κυριάρχη μέθοδος για την αφαλάτωση υφάλμυρων διαλυμάτων. Αν και χρησιμοποιούταν λιγότερο για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, τα τελευταία χρόνια η χρήση της έχει επεκταθεί ακόμα και σε πολύ μεγάλου μεγέθους συστήματα που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν μόνο θερμικές μέθοδοι. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ενεργειακές απαιτήσεις της μεθόδου είναι οι χαμηλότερες και ακόμα λόγω υιοθέτησης νέων τεχνολογικών καινοτομιών (όπως συστήματα ανάκτησης ενέργειας) μειώνονται ακόμα περισσότερο.

Όσον αφορά στην αφαλάτωση υφάλμυρων διαλυμάτων, το κόστος για μεσαίου μεγέθους συστήματα δυναμικότητας περίπου 40.000 m^3/ημέρα, κυμαίνεται μεταξύ των 0,21€/m^3 (0,26$/$m^3$) και 0,43€/$m^3$ (0,54$/$m^3$) [5,6]. Για μικρά συστήματα με ημερήσια δυναμικότητα 20-1.200 m^3 το κόστος είναι πάνω από δυο φορές μεγαλύτερο και κυμαίνεται από 0,62€/m^3 (0,78$/$m^3$) μέχρι 1,06€/$m^3$ (1,33$/$m^3$) [9-12]. Επιπλέον, υπολογισμοί για πολύ μικρά συστήματα της τάξης των μερικών κυβικών μέτρων τη μέρα δίνουν κόστος αισθητά υψηλότερο, από 4,50€/m^3 μέχρι και 10,32€/m^3 [3].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης λόγω των χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεών της έχει γίνει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερα ανταγωνιστική και στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού ακόμα και για μεγάλες μονάδες. Να σημειωθεί πως έχουν αναφερθεί συστήματα δυναμικότητας ακόμα και 320.000 m^3/ημέρα. Έτσι, για μεγάλα συστήματα με ημερήσια παραγωγή φρέσκου νερού 100.000-320.000 m^3 το κόστος κυμαίνεται μεταξύ των 0,36€/m^3 (0,45$/$m^3$) και 0,53€/$m^3$ (0,66$/$m^3$) [28,34,41]. Για μεσαίου μεγέθους συστήματα με ημερήσια δυναμικότητα από 15.000 – 60.000 m^3 το κόστος κυμαίνεται από 0,38€/m^3 (0,48$/$m^3$) μέχρι 1,30€/$m^3$ (1,62$/$m^3$) [5,6,24,26,27,29,30,32]. Για τα μικρά συστήματα, οι εκτιμήσεις για συστήματα τάξης μεγέθους μεταξύ 1.000 και 4.800 m^3/ημέρα, αναφέρουν κόστος παραγόμενου νερού ανάμεσα σε 0,56€/m^3 (0,70$/$m^3$) και 1,38€/$m^3$ (1,72$/$m^3$) [5,13,20,22,23]. Ακόμα μικρότερα συστήματα από τα προαναφερθέντα, με ημερήσια δυναμικότητα από 250 μέχρι 1.000 m^3 παράγουν νερό με κόστος πάνω από 1,00€/m^3 και μέχρι 3,14€/m^3 [5,13,16,19]. Τέλος έχουν αναφερθεί και κάποιες πολύ μικρές μονάδες αφαλάτωσης (λιγότερο απο 100 m^3 ημερήσια παραγωγή) με πολύ υψηλότερο κόστος που μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 15€/m^3 [3,15,17,18,42]. Στον Πίνακα 6.4 συνοψίζονται όλα τα κόστη που σχετίζονται με την αντίστροφη ώσμωση και ομαδοποιούνται ανάλογα με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας.

Πίνακας 6.4 Κόστος αφαλάτωσης νερού με χρήση μεμβρανών (αντίστροφη ώσμωση)

Νερό τροφοδοσίας	Μέγεθος μονάδας (m^3/μέρα)	Κόστος ανα m^3	Πηγή
Υφάλμυρο	<20	4,50€-10,32€	[3]
	20-1.200	0,62€-1,06€ (0,78$-1,33$)	[9-12]
	40.000-46.000	0,21€-0,43€ (0,26$-0,54$)	[5,6]
Θαλασσινό	<100	1,20€-15,00€	[3,15,17,18,42]
	250-1.000	1,00€-3,14€	[5,13,16,19]
	1.000-4.800	0,56€-1,38€ (0,70$-1,72$)	[5,13,20,22,23]
	15.000-60.000	0,38€-1,30€ (0,48$-1,62$)	[5,6,24,26,27,29,30,32]
	100.000-320.000	0,36€-0,53€ (0,45$-0,66$)	[28,34,41]

6.5 Κόστος αφαλάτωσης νερού και υβριδικά συστήματα

Οι μονάδες αφαλάτωσης μπορεί να χρησιμοποιούν υβριδικά συστήματα για να αυξήσουν την παραγωγικότητά τους και να μειώσουν το κόστος του παραγόμενου νερού. Μια μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας ή ακόμα και ένα μίγμα διαφορετικών μεθόδων αφαλάτωσης.

Όσον αφορά στην πρώτη περίπτωση, η Τζεν [3] παρουσίασε δυο μικρά συστήματα αφαλάτωσης τα οποία παράγουν 3 m^3/ημέρα και τα οποία

χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά για να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ενέργεια αλλά συνδυάζονται και με ανεμογεννήτριες, ωστέ να εξασφαλίζεται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό το αδιάκοπο της λειτουργίας των συστημάτων. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε υφάλμυρο νερό για την τροφοδότηση του συστήματος αφαλάτωσης, με κόστος 7,53€/m^3 ενώ στη δεύτερη που χρησιμοποιήθηκε θαλασσινό νερό το κόστος ανέβαινε στα 23€/m^3. Οι Mohamed και Παπαδάκης [15], χρησιμοποποιώντας συνδυασμούς ηλιακής και αιολικής ενέργειας για την τροφοδότηση συστημάτων αφαλάτωσης εκτίμησαν το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού από θαλασσινό νερό μεταξύ 5,21€/m^3 και 5,28€/m^3. Τέλος άλλοι, χρησιμοποιώντας μονάδες δυναμικότητας περίπου 300 m^3/ημέρα, έδειξαν πως όταν συνδυαστούν ανεμογεννήτριες με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, τότε το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού μπορεί να είναι ακόμα πιο χαμηλό, της τάξης των 2,43€/m^3 [16].

Υπάρχουν επίσης υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης τα οποία συνδυάζουν διαφορετικές μεθόδους αφαλάτωσης. Οι Tian et al. [36] έδειξαν πως όταν μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού ημερήσιας δυναμικότητας 528.000 m^3 που χρησιμοποιεί την μέθοδο MSF συνδυαστεί με μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας νερού, το κόστος μπορεί να μειωθεί περίπου κατά 15%. Επιπλέον άλλοι [29] παρουσίασαν ένα σύστημα MED το οποίο σε συνδυασμό με τη μέθοδο VC παράγει 36.000 m^3 φρέσκο νερό ημερησίως με κόστος 0,59€/m^3 (0,73$/$m^3$).

Παράλληλα, οι Turek και Dydo [43] υποστηρίζουν πως ένα υβριδικό σύστημα μεμβρανών-θερμικό φαίνεται πως έχει καλύτερα αποτελέσματα από ένα σύστημα μόνο μεμβρανών καθώς μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη συγκέντρωση άλμης, άρα μεγαλύτερο ποσοστό του νερού τροφοδοσίας που μετατρέπεται σε πόσιμο νερό. Έτσι μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα Νανοδιήθησης – RO – MSF και κατέληξαν πως το ποσοστό του νερού που μπορούσε να μετατραπεί σε πόσιμο με τον τρόπο αυτό φτάνει το 77,2% με ένα κόστος τόσο χαμηλό όσο 0,30€/m^3 (0,37$/$m^3$).

6.6 Συμπεράσματα

Το κόστος της αφαλάτωσης νερού έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης αλλά και της προσπάθειας για βελτιστοποίηση σε έναν κόσμο με συνεχώς αυξανόμενες τιμές για τα ορυκτά καύσιμα. Για συστήματα που χρησιμοποιούν συμβατικές μορφές ενέργειας και το νερό τροφοδοσίας είναι θαλασσινό, το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από 0,40€/m^3 μέχρι και 3,00€/m^3. Στην περίπτωση που το χρησιμοποιούμενο νερό είναι υφάλμυρο συνήθως το κόστος περιορίζεται στο μισό. Όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε το κόστος ανεβαίνει αισθητά φτάνοντας τα 15€/m^3 ή και ακόμα παραπάνω. Παρόλα αυτά, το περιβαλλοντικό όφελος σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγαλύτερο.

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος αφαλάτωσης είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού. Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεσαίου και μεγάλου μεγέθους συστήματα ενώ οι μέθοδοι μεμβρανών είναι περισσότερο διαδεδομένες για μεσαίου και μικρού μεγέθους συστήματα αφαλάτωσης και οι μοναδικές που χρησιμοποιούνται για αφαλάτωση υφάλμυρων διαλυμάτων. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια οι μέθοδοι μεμβρανών και κυρίως η αντίστροφη ώσμωση εξαπλώνονται ταχύτατα και χρησιμοποιούνται ακόμα και σε πολυ μεγάλες μοναδες αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης α) η κατανάλωσή τους είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, μεσω της χρησιμοποίησης νέων συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, αλλά και β) το κόστος των μεμβρανών που αποτελούν σημαντικό φορέα κόστους, συνεχώς μειώνεται.

Τέλος σε κάποιες ειδικές περιπώσεις έχει διαφανεί πως η χρήση υβριδικών συστημάτων τόσο για την παραγωγή της ενέργειας, όσο και για την καθεαυτού τεχνική της αφαλάτωσης μπορεί να δώσει χαμηλότερο κόστος στο ανα κυβικό μέτρο παραγόμενο φρέσκο νερό.

6.7 Βιβλιογραφία

1. M.H.I. Dore, Forecasting the economic costs of desalination technology, Desalination, 172 (2005) 207–214.
2. AMTA (American Membrane Technology Association), Desalting Facts: How Much Does Desalted Water Cost? 2001a, [Online]. Available: http://www.membranes-amta.org/media/pdf/ desaltingcost.pdf. [2003, October 28].
3. E. Tzen, (2006), Renewable energy sources for desalination, Paper presented at Workshop on Desalination Units Powered by RES, Athens.
4. E. Delyianni and B. Belessiotis, Methods and Desalination Systems — Principles of the Desalination Process, NCSR "Demokritos", Athens, Greece, 1995.
5. S.A. Avlonitis, Operational water cost and productivity improvements for small-size RO desalination plants, Desalination, 142 (2002) 295–304.
6. S. Chaudhry, Unit cost of desalination, CA Desalination Task Force Sausalito, CA, July 30, 2003.
7. D.P. Rico and M.F.C. Arias, A reverse osmosis potable water plant at Alicante University: first years of operation, Desalination, 137 (2001) 91–102.
8. M.D. Afonso, J.O. Jaber and M.S. Mohsen, Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan, Desalination, 164 (2004) 157–171.
9. I.C. Karagiannis and P.G. Soldatos, Current status of water desalination in the Aegean Islands, Desalination, 203 (2007) 56–61.
10. Y. Al-Wazzan, M. Safar, S. Ebrahim, N. Burney and A. Mesri, Desalting of subsurface water using spiral-wound reverse osmosis (RO) system: technical and economic assessment, Desalination, 143 (2002) 21–28.

11. I.S. Jaber and M.R. Ahmed, Technical and economic evaluation of brackish groundwater
desalination by reverse osmosis (RO) process, Desalination, 165 (2004) 209–213.
12. D. Sambrailo, J. Ivic and A. Krstulovic, Economic evaluation of the first desalination plant in Croatia, Desalination, 170 (2005) 339–344.
13. A. Hafez and S. El-Manharawy, Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study, Desalination, 153 (2002) 335–347.
14. E. Tzen and R. Morris, Renewable energy sources for desalination, Solar Energy, 75 (2003) 375–379.
15. E.S. Mohamed and G. Papadakis, Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics, Desalination, 164 (2004) 87–97.
16. S.A. Kershman, J. Rheinlander, T. Neumann and O. Goebel, Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya — Gecol's facility for medium and small scale research at Ras Ejder, Desalination, 183 (2005) 1–12.
17. D. Manolakos, S. Kyritsis, G. Papadakis, J. Karagiannis and P. Soldatos, Cost Analysis
and Economic Evaluation of an Autonomous Low-Temperature Solar Rankine Cycle System
for Reverse Osmosis Desalination — Comparison with a Simple Solar Still Desalination System, WSEAS Transactions on Environment and Development, 1, 2005
18. E.S. Mohamed, G. Papadakis, E. Mathioulakis and V. Belessiotis, The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation, Desalination, 184 (2005) 241–246.
19. D. Voivontas, K. Misirlis, E. Manoli, G. Arampatzis, D. Assimacopoulos and A. Zervos, A tool for the design of desalination

plants powered by renewable energies, Desalination, 133 (2001) 175–198.
20. M.A. Rayan and I. Khaled, Seawater desalination by reverse osmosis (case study), Desalination, 153 (2002) 245–251.
21. D. Voivontas, G. Arampatzis, E. Manoli, C. Karavitis and D. Assimacopoulos, Water supply modeling towards sustainable environmental management in small islands: the case of Paros, Greece, Desalination, 156 (2003) 127–135.
22. D. Zejli, R. Benchrifa, A. Bennouna and K. Zazi, Economic analysis of wind-powered desalination in the south of Morocco, Desalination, 165 (2004) 219–230.
23. U. Atikol and H.S. Aybar, Estimation of water production cost in the feasibility analysis of RO systems, Desalination, 184 (2005) 253–258.
24. G.F. Leitner, Total water costs on a standard basis for three large, operating, SWRO plants, Desalination, 81 (1991) 39–48.
25. J. Tian, G. Shi, Z. Zhao and D. Cao, Economic analyses of a nuclear desalination system using deep pool reactors, Desalination, 123 (1999) 25–31.
26. A. Poullikas, Optimization algorithm for reverse osmosis desalination economics, Desalination, 133 (2001) 75–81.
27. N.M. Wade, Distillation plant development and cost update, Desalination, 136 (2001) 3–12.
28. J. Andriane and F. Alardin, Thermal and membrane process economics: optimized selection for seawater desalination, Desalination, 153 (2002) 305–311.
29. S. Wu and Z. Zhang, An approach to improve the economy of desalination plants with a nuclear heating reactor by coupling with hybrid technologies, Desalination, 155 (2003) 179–185.
30. S.P. Agashichev, Analysis of integrated co-generative schemes including MSF, RO and power generating systems (present value of

expenses and “levelised” cost of water), Desalination, 164 (2004) 281–302.

31. H. Ettouney, Visual basic computer package for thermal and membrane desalination processes, Desalination, 165 (2004) 393–408.

32. S.P. Agashichev and A.M. El-Nashar, Systemic approach for techno-economic evaluation of triple hybrid (RO, MSF and power generation) scheme including accounting of CO2 emission, Energy, 30 (2005) 1283–1303.

33. L. Tian, Y. Wang and J. Guo, Economic analysis of a 2 □□200 MW nuclear heating reactor for seawater desalination by multi-effect distillation (MED), Desalination, 152 (2002) 223–228.

34. R. Borsani and S. Rebagliati, Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, Desalination, 182 (2005) 29–37.

35. A. Ophir and F. Lokiec, Advanced MED process for most economical sea water desa-lination, Desalination, 182 (2005) 187–198.

36. L. Tian, J. Guo, Y. Tang and L. Cao, A historical opportunity: economic competitiveness of seawater desalination project between nuclear and fossil fuel while the world oil price over $50 per boe — part A: MSF, Desalination, 183 (2005) 317–325.

37. S. Wu, Analysis of water production costs of a nuclear desalination plant with a nuclear heating reactor coupled with MED processes, Desalination, 190 (2006) 287–294.

38. J.K. Kaldellis, K.A. Kavadias and E. Kondili, Renewable energy desalination plants for the Greek islands — technical and economic considerations, Desalination, 170 (2004) 187–203.

39. E. Manoli, D. Assimacopoulos and C.A. Karavitis, Water supply management approaches using RES on the island of Rhodes, Greece, Desalination, 161 (2004) 179–189.

40. G. Fiorenza, V.K. Sharma and G. Braccio, Technoeconomic evaluation of a solar powered water desalination plant, Ener. Conv. Manag., 44 (2003) 2217–2240.
41. Y. Dreizin, Ashkelon seawater desalination project — off-taker's self costs, supplied water costs, total costs and benefits, Desalination, 190 (2006) 104–116.
42. E.S. Mohamed, G. Papadakis, E. Mathioulakis and V. Belessiotis, An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with an hydraulic energy recovery unit, Desalination, 194 (2006) 239–250.
43. M. Turek and P. Dydo, Hybrid membrane-thermal versus simple membrane systems, Desalination, 157 (2003) 51–56.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟ ΧΩΡΟ

7.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, τα ελληνικά νησιά αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα έλλειψης νερού. Η μέθοδος της αφαλάτωσης, αν και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες λύσεις, απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας που ποικίλουν ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, με σημαντικές όμως επιπτώσεις για το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια αρκετές μονάδες αφαλάτωσης έχουν εγκατασταθεί στα ελληνικά νησιά [1]. Ο στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους των συστημάτων αφαλάτωσης νερού στα ελληνικά νησιά, ώστε να βελτιωθούν τα συστήματα παραγωγής νερού και να εγκατασταθούν τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Για τον λόγο αυτόν έχει πραγματοποιηθεί Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment) για διαφορετικά συστήματα αφαλάτωσης που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε νησιά διαφορετικού μεγέθους με σημαντική έλλειψη σε πόσιμο νερό όπως η Θηρασία και η Μήλος. Συγκεκριμένα, εξετάζεται ένα μικρό σύστημα αφαλάτωσης που θα μπορούσε να εγκατασταθεί στη Θηρασία και να λύσει το πρόβλημα της έλλειψης νερού, το οποίο τροφοδοτείται ενεργειακά είτε από το δίκτυο ή από φωτοβολταϊκά και το οποίο συγκρίνεται με ένα αρκετά μεγαλύτερο σύστημα που έχει ήδη εγκατασταθεί στη Μήλο και δύναται να χρησιμοποιήσει ενέργεια προερχόμενη είτε από το δίκτυο ή από ανεμογεννήτριες. Πραγματοποιείται λοιπόν σύγκριση διαφορετικού μεγέθους συστημάτων αλλά και εναλλακτικών τρόπων παραγωγής της απαιτούμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν πως ένα σύστημα αφαλάτωσης έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά

μονάδα παραγόμενου νερού όσο μεγαλύτερο είναι το μεγεθός του και επιπλέον ότι η χρήση των ανεμογεννητριών είναι η λιγότερο επιβαρυντική προς το περιβάλλον μέθοδος παραγωγής ενέργειας, τόσο σε σχέση με αυτήν που προέρχεται από το δίκτυο όσο και σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά.

7.2 Η μεθοδολογία της εκτίμησης κύκλου ζωής (LCA)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κύριος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διαδικασίας της αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο κύκλου ζωής και ένας κατάλογος υλικών για τα συστήματα αφαλάτωσης, και παρουσιάζεται περιβαλλοντική (LCA) μελέτη για δυο νησιά των Κυκλάδων με διαφορετικές ανάγκες σε πόσιμο νερό, τη Θηρασία και τη Μήλο.

Η μεθοδολογία LCA για μια διαδικασία περιλαμβάνει 4 βασικά βήματα [2]:

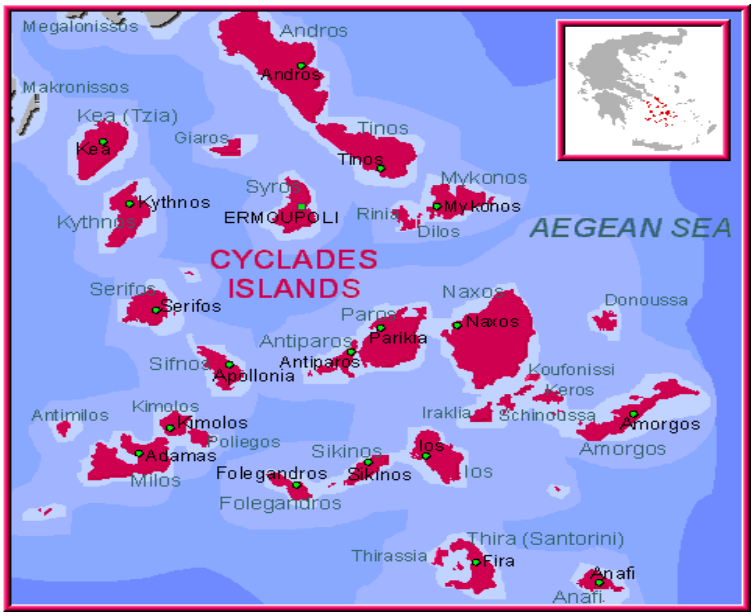
- Τον προσδιορισμό του σκοπού και του πλαισίου
- Τον καθορισμό του καταλόγου των υλικών
- Την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης και
- Την ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Υπάρχουν μόνο λίγες δημοσιευμένες εργασίες που να αφορούν στην Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA) για αφαλάτωση νερού. Οι Raluy, Serra και Uche [3-5] έχουν συγκρίνει τις κυριότερες τεχνολογίες αφαλάτωσης (θερμικές και μεμβρανών) και κατέληξαν σε δυο σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον, το περιβαλλοντικό 'βάρος' κατά τη λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που προέρχεται από τα στάδια τόσο της συναρμολόγησης – εγκατάστασης, όσο και της απόρριψης των υλικών που απαιτούνται για την εγκατάσταση της μονάδας. Αυτό παρατηρείται λόγω των πολύ μεγάλων ενεργειακών αναγκών της διαδικασίας

της αφαλάτωσης. Δεύτερον, η τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης είναι η περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον, λόγω των εξαιρετικά χαμηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων (5-6 φορές λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλες μεθόδους).

7.3 Η αφαλάτωση νερού σε Θηρασία και Μήλο

Μέχρι σήμερα, δεν έχει υπάρξει κάποια δημοσιευμένη μελέτη που να αφορά σε LCA για συστήματα αφαλάτωσης νερού στην Ελλάδα. Επιπλέον, η περίπτωση της Ελλάδας είναι αρκετά πολύπλοκη, καθώς υπάρχουν πολλά διαφορετικού μεγέθους νησιά διάσπαρτα στο Αιγαίο, τα οποία αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη μας, δυο διαφορετικού μεγέθους νησιά των Κυκλάδων έχουν επιλεγεί: Ένα μικρού μεγέθους όπως η Θηρασία και ένα αρκετά μεγαλύτερου μεγέθους, που είναι η Μήλος. Τα δύο νησιά βρίσκονται νοτιοανατολικά της Αθήνας σε απόσταση 150 χλμ. η Μήλος και 250 χλμ. η Θηρασία. Η θέση τους στο χάρτη της Ελλάδας φαίνεται στην Εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1 Χάρτης των Κυκλάδων

7.3.1 Το σύστημα της αφαλάτωσης για τη Θηρασία

Το νησί της Θηρασίας έχει 268 μόνιμους κατοίκους. Μέχρι σήμερα, δεν έχει εγκατασταθεί καμμία μονάδα αφαλάτωσης στο νησί. Κάποιες μικρές μονάδες σαν αυτές που έχουν ήδη εξεταστεί από το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών σε παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας θα μπορούσαν να εγκατασταθούν ως μέρος ενός αποκεντρικοποιημένου τοπικού δικτύου, ώστε να ικανοποιηθούν οι τοπικές ανάγκες σε πόσιμο νερό. Από προηγούμενες μελέτες έχει φανεί πως ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι μια εφικτή λύση από πλευρά τόσο τεχνική όσο και οικονομική [6] και λεπτομερειακά στοιχεία λειτουργίας του είναι διαθέσιμα ώστε να χρησημοποιηθούν στην μελέτη LCA.

Το σύστημα αποτελείται από μια μικρή μονάδα αφαλάτωσης που τροφοδοτείται ενεργειακά από φωτοβολταϊκά, εκμεταλλευόμενο το υψηλό ηλιακό δυναμικό της χώρας μας. Η μονάδα αφαλάτωσης έχει δυναμικότητα 1 m^3/μέρα, ανάκτηση νερού 10% (το ποσοστό του θαλασσινού νερού που μετατρέπεται σε πόσιμο) και είναι ικανή να παράγει 300 m^3/χρόνο σε πραγματικές συνθήκες. Η ενέργεια που απαιτείται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι περίπου 4 kWh/m^3 παραγόμενου φρέσκου νερού χρησιμοποιώντας σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Το σύστημα αφαλάτωσης έχει μέση ζωή 20 ετών, οπότε σε αυτό το διάστημα θα μπορούν να παραχθούν 6.000 m^3 φρέσκου νερού καταναλώνοντας 24.000 kWh. Δυο εναλλακτικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μονάδα αφαλάτωσης στη Θηρασία έχουν εξεταστεί:

1. Η απευθείας σύνδεση με φωτοβολταϊκά (χωρίς χρήση μπαταριών). Το σύστημα των φωτοβολταϊκών αποτελείται από 18 Arco-Solar μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (panels) με συνολική ισχύ 846 W. Το κύριο πλεονέκτημα της μη χρήσης μπαταριών είναι η απλότητα του συστήματος και οι χαμηλότερες απαιτήσεις σε συντήρηση. Από την άλλη, λόγω των διακυμάνσεων στην παροχή ενέργειας, η πίεση στις

μεμβράνες δεν είναι συνεχής, περιορίζοντας την ωφέλιμη ζωή τους σε περίπου 4 χρόνια. Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για τα φωτοβολταϊκά είναι 30 χρόνια [7].

2. Η χρησιμοποίηση ενέργειας από το δίκτυο του νησιού. Το νησί της Θηρασίας είναι συνδεδεμένο με υποθαλάσσια καλώδια με το θερμικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας που βρίσκεται στη Θήρα, σε πολύ κοντινή απόσταση. Το εργοστάσιο της Θήρας χρησιμοποιεί 10 μηχανές diesel με συνολική δυναμικότητα περίπου 40 MW. Οι μηχανές έχουν μέση ειδική κατανάλωση 235 gr/kWh και χρησιμοποιούν ως καύσιμο το μαζούτ που έχει κατώτερη θερμική ικανότητα (LHV) 40,2 MJ/kg. Συνολικά 5280 kg (212.256 MJ) μαζούτ απαιτούνται για την ικανοποίηση των αναγκών του συστήματος αφαλάτωσης για 20 χρόνια.

7.3.2 Το σύστημα της αφαλάτωσης για τη Μήλο

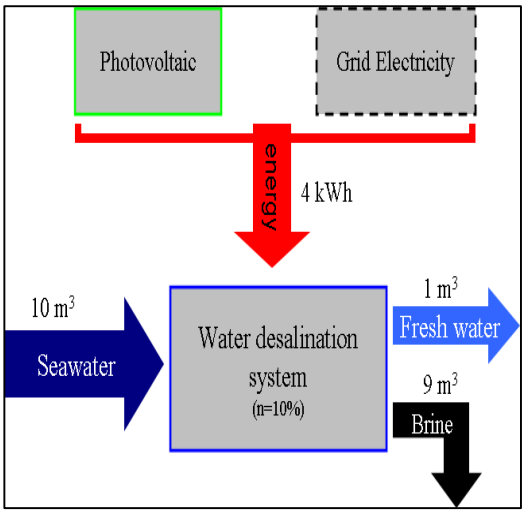
Το νησί της Μήλου είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό της Θηρασίας και έχει 5.000 μόνιμους κατοίκους. Στο νησί έχει πρόσφατα εγκατασταθεί σύστημα αφαλάτωσης νερού, τα δεδομένα της οποίας μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο. Το σύστημα της αφαλάτωσης τροφοδοτείται με θαλασσινό νερό, αποτελείται από τέσσερις όμοιες μονάδες συνολικής δυναμικότητας 2.240 m^3 και η ανάκτηση φρέσκου νερού είναι περίπου 35%. Η ετήσια παραγωγή του συστήματος υπολογίζεται σε 450.000 m^3, απαιτώντας 2,5kWh/m^3 με χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας [7]. Συνολικά στα 20 χρόνια που είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μονάδας, θα παραχθούν 9 εκατ. m^3 πόσιμου νερού και θα καταναλωθούν 22.500MWh. Δυο εναλλακτικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μονάδα αφαλάτωσης της Μήλου έχουν εξεταστεί:

1. Μια ανεμογεννήτρια δυναμικότητας 600kW έχει εγκατασταθεί στο νησί για να παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την αφαλάτωση. Παρόλα αυτά, επειδή η παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο παρουσιάζει

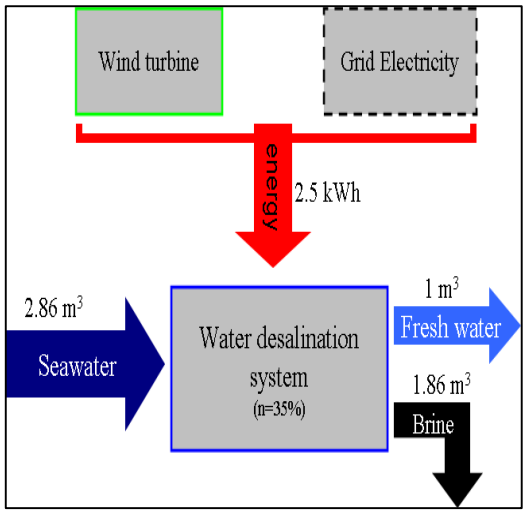
πολύ μεγάλες διακυμάνσεις (εποχικά, ημερησίως, ακόμα και από ώρα σε ώρα) η ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η μονάδα αφαλάτωσης είναι συνδεδεμένη απευθείας με το δίκτυο, αλλά επειδή η παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας είναι σε ετήσια βάση μεγαλύτερη από αυτήν που καταναλώνεται για την αφαλάτωση, θεωρείται πως η ενέργεια που καταναλώνεται για αφαλάτωση προέρχεται καθ'ολοκληρίαν από την ανεμογεννήτρια. Εξ'άλλου, ο λόγος εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας ήταν η κάλυψη των πρόσθετων ενργειακών απαιτήσεων της μονάδας αφαλάτωσης. Το αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι ιδαίτερα υψηλό και έχει υπολογιστεί σε πάνω από 5,3 m/s [9]. Επίσης η ανεμογεννήτρια έχει εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 20 χρόνια [7].

2. Ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας είναι ήδη εγκατεστημένο στο νησί για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών του. Αποτελείται από 9 μηχανές diesel και έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 13MW, μέση ειδική κατανάλωση 235gr/kWh και κατώτερη θερμική ικανότητα (LHV) 40,2MJ/kg. Στα 20 χρόνια λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης αναμένεται να παραχθούν 9 εκατ. m^3 φρέσκο νερό και να καταναλωθούν 5.625 τόννοι μαζούτ (226.125 GJ).

Τα δύο διαφορετικά μοντέλα για το κάθε νησί περιγράφονται σχηματικά στις Εικόνες 7.2 και 7.3.



Εικόνα 7.2 Μοντέλο Θηρασίας



Εικόνα 7.3 Μοντέλο Μήλου

7.4 LCA για τα συστήματα αφαλάτωσης

7.4.1 Προσδιορισμός του σκοπού και του πλαισίου

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αφαλάτωσης νερού στα ελληνικά νησιά, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά συστήματα παραγωγής ενέργειας και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Για να γίνει αυτό, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο καθώς και κατάλογος των υλικών για τα συστήματα αφαλάτωσης και πραγματοποιήθηκε μια περιβαλλοντική συγκριτική μελέτη LCA για δυο διαφορετικού μεγέθους νησιά, στοχεύοντας στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μονάδων αφαλάτωσης διαφορετικής δυναμικότητας. Η λειτουργική μονάδα[2] έχει καθοριστεί ως η παραγωγή 1 m^3 φρέσκου νερού. Επιπλέον, εναλλακτικά συστήματα παραγωγής ενέργειας έχουν συμπεριληφθεί, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και

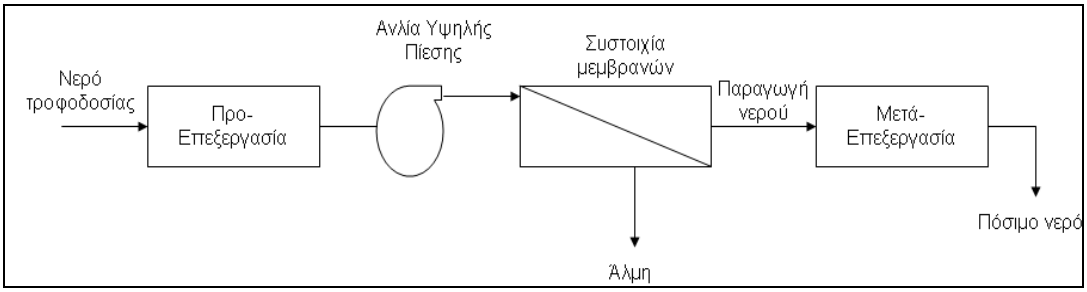
[2] Η λειτουργική μονάδα είναι μια ποσοτική περιγραφή της ανάγκης που πρόκειται να ικανοποιηθεί από το υπό εξέταση σύστημα. Αποτελεί μια μονάδα αναφοράς, ώστε να καθίσταται δυνατό να συγκριθούν ανόμοια συστήματα.

μηχανές diesel, ώστε να πραγματοποιηθεί μια ευρεία συγκριτική LCA σχετικά με τον κύριο σκοπό της έρευνας.
Στην ανάλυση LCA που πραγματοποιήθηκε, συμπεριελήφθησαν τα στάδια της παραγωγής και λειτουργίας των συστημάτων αφαλάτωσης. Τα στάδια της αποσυναρμολόγησης και απόρριψης των υλικών δεν ελήφθησαν υπόψη, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα και επιπρόσθετα, έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία πως το τέλος της ζωής της μονάδας αφαλάτωσης θα μπορούσε να παραληφθεί χωρίς ιδιαίτερη διαφοροποίηση στα αποτελέσματα [4]. Επίσης, δεν έχει εξεταστεί η περιβαλλοντική επίπτωση του αλατώδους διαλύματος που δημιουργείται ως κατάλοιπο από τη διαδικασία της αφαλάτωσης, καθώς μελέτες έχουν δείξει πως δεδομένων των μεγεθών η επίπτωσή του δεν είναι τόσο σημαντική για το θαλάσσιο περιβάλλον [4,10].

7.4.2 Καθορισμός του καταλόγου των υλικών

Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια μέθοδος αφαλάτωσης στην οποία ένα υδατικό διάλυμα (θαλασσινό ή υφάλμυρο) οδηγείται μέσα από μεμβράνες (φιλτράρεται), με αποτέλεσμα το διαχωρισμό του καθαρού πόσιμου νερού από την άλμη. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει διάφορα στάδια, τα οποία περιγράφονται στην Εικόνα 7.4. Στο πρώτο στάδιο, γίνεται η προκατεργασία και χρησιμοποιούνται χημικά και φίλτρα, ώστε να απομακρυνθούν υλικά που μπορεί να περιέχονται στο νερό και να μειωθεί η επικάθιση αλάτων και άλλων ρυπαρών ουσιών. Στη συνέχεια, το διάλυμα με τη βοήθεια αντλίας, διοχετεύεται σε ένα κλειστό δοχείο και ωθείται πάνω σε μια μεμβράνη. Τέλος, πραγματοποιείται μια τελική επεξεργασία, ώστε να απομακρυνθούν αέρια, να διορθωθεί το pH και τελικά να καταστεί το νερό έτοιμο για διανομή. Η ενέργεια είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της αντλίας. Τα κυριότερα μέρη μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης είναι μια αντλία υψηλής πίεσης, ένας ηλεκτροκινητήρας, θήκες μεμβρανών και μια

δεξαμενή αποθήκευσης του φρέσκου νερού. Τα αναλώσιμα αφορούν κυρίως μεμβράνες και χημικά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης έχει δύο υποπροϊόντα, το φρέσκο νερό και το παχύρευστο αλατώδες διάλυμα (brine).



Εικόνα 7.4 Βασική δομή μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης

Τα κύρια χημικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν γενικά στην κατεργασία του υδατικού διαλύματος είναι το υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl) ή χλωριούχα διαλύματα για την εμπόδιση σχηματισμού μικροοργανισμών, ο χλωριούχος σίδηρος ($FeCl_3$) για την αποφυγή κροκύδωσης (flocculation) και απομάκρυνση διαφόρων υλικών από το νερό, θειικό ή υδροχλωρικό οξύ για την διόρθωση του pH, εξαμεταφωσφορικό νάτριο ή παρόμοια χημικά για την αποτροπή σχηματισμού ιζήματος στις σωλήνες και υποθειώδες νάτριο ($NaHSO_3$) για την εξουδετέρωση των υπολυμάτων της χλωρίνης [10,11]. Στις μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως ο δολομίτης ($CaMg(CO_3)_2$) και το υποχλωριώδες νάτριο.

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι κατάλογοι των υλικών για τα δυο συστήματα αφαλάτωσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από τεχνικές και λειτουργικές πληροφορίες διαθέσιμες για τα συστήματα αφαλάτωσης, υποστηριζόμενα από δεδομένα κύκλου ζωής προερχόμενα από τη βάση δεδομένων Ecoinvent v2.0 [12]. Το μοντέλο LCA για τα δυο συστήματα έχει υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό Simapro 7.1 [13]. Αξίζει να σημειωθεί πως η μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο

έχει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας αλλά και χαμηλότερες απαιτήσεις σε μεμβράνες.

Πίνακας 7.1 Κατάλογος υλικών για το σύστημα αφαλάτωσης στη Θηρασία (300m³/έτος)

Εκροές			**Ποσότητα**	
			Σύνολο (20 έτη)	**Ανα m³**
Παραγωγή φρέσκου νερού			6,000 m³	1 m³
Άλμη			54,000 m³	9 m³
Εισροές				
		Κύριο υλικό		
Λειτουργία εργοστασίου	Θαλασσινό νερό (35,000 ppm TDS)	Θαλασσινό νερό	60,000 m³	10 m³
	Ηλεκτρική ενέργεια (4 kWh/m³)		24,000 kWh	4 kWh
	15 μεμβράνες (Spiral wound thin type composite)	Πολυαμίδη	180 kg	30 gr
	Δολομίτης	80% $CaCO_3$, 20% $MgCO_3$	12 kg	2 gr
	Υποχλωριώδες νάτριο	NaOCl	2.64 kg	0.44 gr
Εγκατάσταση	1 DC κινητήρας	Αλουμίνιο	10.5kg	1.75 gr
	1 αντλία νερού	Ανοξείδωτο ατσάλι	1.9 kg	0.32 gr
	1 σύστημα ανάκτησης ενέργειας	Αλουμίνιο	24 kg	4 gr
	Σωληνώσεις	PVC	40 kg	6.7 gr
	1 δεξαμενή αποθήκευσης (1m³)	Πολυαιθυλένιο	35 kg	5.8 gr
	3 δοχεία μεμβρανών	Υαλόνημα	15 kg	2.5 gr

Πίνακας 7.2 Κατάλογος υλικών για το σύστημα αφαλάτωσης στη Μήλο (450,000m³/έτος)

Εκροές			**Ποσότητα**	
			Σύνολο (20 έτη)	**Ανα m³**
Παραγωγή φρέσκου νερού			9,000,000 m³	1 m³
Άλμη			16,700,000 m³	1.86 m³
Εισροές				
		Κύριο υλικό		
Λειτουργία εργοστασίου	Θαλασσινό νερό (35,000 ppm TDS)	Θαλασσινό νερό	25,700,000 m³	2.86 m³
	Ηλεκτρική ενέργεια (2.5 kWh/m³)		22,500 MWh	2.5 kWh
	840 μεμβράνες	Πολυαμίδη	10,080 kg	1.12 gr
	Δολομίτης	80% $CaCO_3$, 20% $MgCO_3$	18,000 kg	2 gr
	Υποχλωριώδες νάτριο	NaOCl	3,960 kg	0.44 gr
Εγκατάσταση	12 αντλίες BMP 10.2 R GRUNDFOS	Ανοξείδωτο ατσάλι	3,264 kg	0.36 gr
	4 αντλίες 904L BM-R GRUNDFOS	Ανοξείδωτο ατσάλι	280 kg	0.03 gr
	4 εναλλάκτες πίεσης ERI PX-220	Αλουμίνιο	320 kg	0.04 gr
	168 δοχεία μεμβρανών	Υαλόνημα	840 kg	0.09 gr

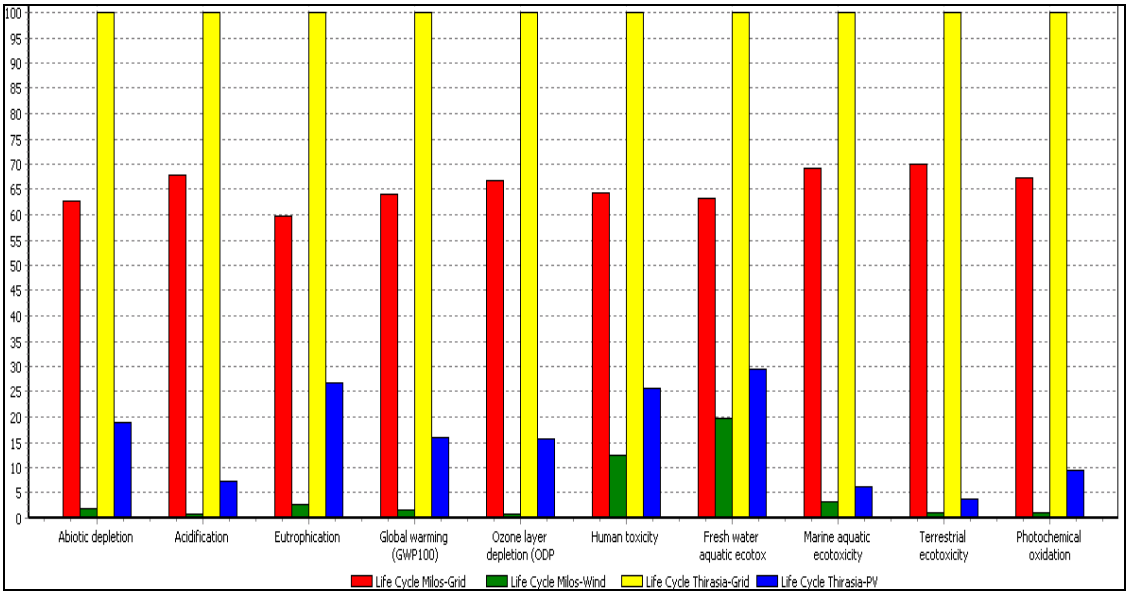
7.4.3 Εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης

Για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης της μεθόδου της αφαλάτωσης σε συνδυασμό με διαφορετικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος CML 2000. Οι υποκατηγορίες επιπτώσεων που μελετήθηκαν είναι:

- Η μείωση αβιοτικών παραγόντων (Abiotic depletion)
- Η οξίνιση (Acidification)

- Ο ευτροφισμός (Eutrophication)
- Η υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming)
- Η καταστροφή του όζοντος (Ozone layer depletion)
- Η τοξικότητα στον άνθρωπο (Human toxicity)
- Η οικοτοξικότητα του φρέσκου νερού (Fresh water aquatic eco-toxicity)
- Η υδάτινη οικοτοξικότητα (Marine aquatic eco-toxicity)
- Η χωρική οικοτοξικότητα (Terrestrial eco-toxicity)
- Η φωτοχημική οξίδωση (Photochemical oxidation)

Η Εικόνα 7.5 παρουσιάζει τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δυο μονάδων αφαλάτωσης στη Θηρασία και στη Μήλο και αφορά σε δυο εναλλακτικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Στην περίπτωση της μονάδας αφαλάτωσης στη Μήλο συγκρίνεται η αφαλάτωση με χρήση ρεύματος από το δίκτυο ηλεκτροδότησης αλλά και η χρήση ρεύματος προερχόμενου από ανεμογεννήτρια. Στην περίπτωση της νήσου Θηρασίας γίνεται σύγκριση ανάμεσα στην αφαλάτωση που γίνεται με χρήση ρεύματος από το δίκτυο, αλλά και η χρήση ρεύματος προερχόμενου από φωτοβολταϊκά πανέλα. Ο Πίνακας 7.3 συμπληρώνει την Εικόνα 7.5 και σε αυτόν συνοψίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κάθε συστήματος αφαλάτωσης υπολογισμένες για 1 m^3 παραγόμενου φρέσκου νερού.



Εικόνα 7.5 Συγκριτικά αποτελέσματα LCA

Πίνακας 7.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά m^3 (CML-2000)

Κατηγορία επιπτώσεων	**Μονάδα μέτρησης**	**Milos-Grid**	**Milos-Wind**	**Thirasia-Grid**	**Thirasia-PV**
Abiotic depletion	kg Sb eq	1.50E-02	4.36E-04	2.28E-02	4.33E-03
Acidification	kg SO_2 eq	2.27E-02	2.73E-04	3.32E-02	2.45E-03
Eutrophication	kg PO_4 eq	0.73E-03	3.43E-05	1.21E-03	3.25E-04
Global warming	kg CO_2 eq	2.35E+00	5.88E-02	3.65E+00	5.78E-01
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.78E-07	3.33E-09	4.12E-07	6.50E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1.58E+00	3.04E-01	2.43E+00	6.28E-01
Fresh water aquatic eco-toxicity	kg 1,4-DB eq	1.76E-01	5.45E-02	2.75E-01	8.10E-02
Marine aquatic eco-toxicity	kg 1,4-DB eq	1.04E+03	4.84E+01	1.50E+03	9.37E+01
Terrestrial eco-toxicity	kg 1,4-DB eq	4.63E-02	7.51E-04	6.60E-02	2.47E-03
Photochemical oxidation	kg C_2H_4	9.93E-04	1.70E-05	1.47E-03	1.40E-04

Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι εκπομπές ισοδύναμου CO_2 (ανάλογα με το αν ανήκουν στο στάδιο της υποδομής – εγκατάστασης ή στη φάση της λειτουργίας του συστήματος) και οι οποίες αποτελούν τον κύριο παράγοντα υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Πίνακας 7.4 Επίδραση της κάθε φάσης της LCA στην κλιματική αλλαγή

	Πηγή ενέργειας	**Φάση LCA**		**kg ισοδύναμου CO_2**	**[%]**
Μήλος	Δίκτυο	Εγκατάσταση		3.17E-03	0.13
		Λειτουργία	Μεμβράνες	9.71E-03	0.41
			Χημικά	4.61E-04	0.02
			Ενέργεια	2.34E+00	99.44
		Σύνολο		**2.35E+00**	100
	Άνεμος	Εγκατάσταση		3.17E-03	5.39
		Λειτουργία	Μεμβράνες	9.71E-03	16.53
			Χημικά	4.61E-04	0.84
			Ενέργεια	4.54E-02	77.24
		Σύνολο		**5.88E-02**	100
Θηρασία	Δίκτυο	Εγκατάσταση		9.92E-02	2.72
		Λειτουργία	Μεμβράνες	2.60E-01	7.13
			Χημικά	4.61E-04	0.01
			Ενέργεια	3.29E+00	90.14
		Σύνολο		**3.65E+00**	100
	Ήλιος	Εγκατάσταση		9.92E-02	17.16
		Λειτουργία	Μεμβράνες	2.60E-01	45.01
			Χημικά	4.61E-04	0.08
			Ενέργεια	2.18E-01	37.74
		Σύνολο		**5.78E-01**	100

7.4.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το σύστημα αφαλάτωσης της Θηρασίας που χρησιμοποιοιεί ρεύμα από το δίκτυο έχει τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ακολουθούμενο από το σύστημα αφαλάτωσης της Μήλου με το ίδιο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτό εξηγείται εύκολα αν αναλογιστούμε τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης της Θηρασίας και βέβαια πως η περιβαλλοντική επίπτωση ενός πιο ενεργοβόρου συστήματος είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή ενός λιγότερο απαιτητικού σε ενέργεια συστήματος. Από την άλλη την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση για όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων είχε η μονάδα αφαλάτωσης της Μήλου η οποία ήταν συνδεδεμένη με την ανεμογεννήτρια.
Επίσης παρατηρείται πως λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων της διαδικασίας της αφαλάτωσης, η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα που συμβάλει στην κλιματική αλλαγή. Στην περίπτωση της μονάδας αφαλάτωσης της Θηρασίας και όταν σε αυτή χρησιμοποιείται ρεύμα που προέρχεται από ηλιακή ενέργεια, λόγω του μικρού μεγέθους της μονάδας αφαλάτωσης, οι μεμβράνες έχουν επίσης σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση.

7.5 Συμπεράσματα

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται σαφές πως λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων της διαδικασίας της αφαλάτωσης, η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα που συντελεί στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Τα σημερινά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά νησιά και έχουν ως κύρια καύσιμη ύλη το μαζούτ, επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον.

Η χρήση των ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με την αφαλάτωση είναι η λιγότερο επιβαρυντική προς το περιβάλλον λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού στα ελληνικά νησιά καθώς μπορεί να επιτευχθεί μέχρι και 40 φορές μικρότερη εκπομπή αερίων CO_2, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επίσης γίνεται εμφανές πως ένα σύστημα αφαλάτωσης έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο μεγαλύτερο είναι το μεγεθός του ειδικά όταν συγκρίνεται ένα πολύ μικρό με ένα μέσου μεγέθους σύστημα αφαλάτωσης. Το αποτέλεσμα αυτό σχετίζεται κυρίως με το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι ένα σύστημα αφαλάτωσης, τόσο χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις ανα κυβικό μέτρο παραγόμενου φρέσκου νερού έχει. Η λύση των φωτοβολταϊκών αποτελεί επίσης φιλική προς το περιβάλλον λύση και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια αλλά χαμηλό αιολικό δυναμικό.

7.6 Βιβλιογραφία

1. Ioannis C. Karagiannis, Soldatos Petros G. (2007): Current status of water desalination in the Aegean Islands. Desalination 203, 56-61

2. ISO 14040 (2006): Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO).

3. R. G. Raluy, Serra L., Uche J. (2005): Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies. Desalination 183, 81-93

4. R. G. Raluy, Serra L., Uche J. (2005): Life Cycle Assessment of Water Production Technologies - Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO). Int. J. Life Cycle Assess. 10, 285-293

5. G. Raluy, Serra L., Uche J. (2006): Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. Energy 31, 2361-2372

6. D. Manolakos, Mohamed E. Sh., Karagiannis I., Papadakis G. (2008): Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island. Desalination 221, 37-46

7. E. Sh. Mohamed, Papadakis G. (2004): Design, simulation and economic analysis of a standalone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics. Desalination 164, 87-97

8. SYCHEM S.A. (2007): Private Communication

9. J. K. Kaldellis, Zafirakis D. (2007): Present situation and future prospects of electricity generation in Aegean Archipelagos islands. Energy Policy 35, 4623-4639

10. J. J. Sadhwani, Veza J. M., Santana C. (2005): Case studies on environmental impact of seawater desalination. Desalination 185, 1-8

11. M. R. Al-Agha, Mortaja R. S. (2005): Desalination in the Gaza Strip: drinking water supply and environmental impact. Desalination 173, 157-171

12. Ecoinvent Centre (2008). www.ecoinvent.ch

13. Pre Consultants(2009), SimaPro7.1. http://www.pre.nl/simapro/simapro_lca_ software.htm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

8.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που αντιμετωπίζει στη σημερινή εποχή η ανθρωπότητα η οποία όμως είναι υπεύθυνη για μεγάλο μερος των φυσικών καταστροφών που απειλούν την ανθρώπινη ζωή και ύπαρξη. Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από σχεδόν κάθε μηχανή που παράγει ενέργεια είναι το κυρίαρχο αέριο υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, στο οποίο οφείλεται η υπερθέρμανση του πλανήτη. Η αφαλάτωση του νερού είναι μια διεργασία ενεργοβόρα και όταν τα συστήματα αφαλάτωσης χρησιμοποιούν συμβατικές μορφές ενέργειας, απελευθερώνονται σημαντικές ποσότητες CO_2. Για κάθε κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού με τη μέθοδο της αφαλάτωσης, υπάρχει μια μείωση των εκπομπών CO_2 κατά δυο περίπου κιλά, όταν για την ενεργειακή τροφοδότηση του συστήματος χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντί για συμβατικές. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντί των συμβατικών, το κόστος του παραγόμενου νερού είναι πολύ υψηλότερο.

Για τη χάραξη σωστής στρατηγικής, για τη λύση του προβλήματος της έλλειψης νερού με τη χρησιμοποίηση τεχνολογιών αφαλάτωσης, χρειάζονται πληροφορίες τόσο για τα κόστη όσο και για τα οφέλη. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτίμηση της οριακής τιμής του κόστους του CO_2 πάνω από το οποίο οι μονάδες αφαλάτωσης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούν 'καθαρές' μορφές ενέργειας έναντι των πιο ρυπογόνων συμβατικών μορφών ενέργειας. Από την έρευνα προέκυψε ότι η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 μπορεί να είναι πολύ κοντά στο κόστος παγίδευσης του CO_2 και σε πολλές

περιπτώσεις χαμηλότερη και από τις οικονομικές κυρώσεις που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πολλές μελέτες περίπτωσης για την αφαλάτωση του νερού στα νησιά του Αιγαίου επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα αυτά.

8.2 Το περιβαλλοντικό πρόβλημα και η αφαλάτωση

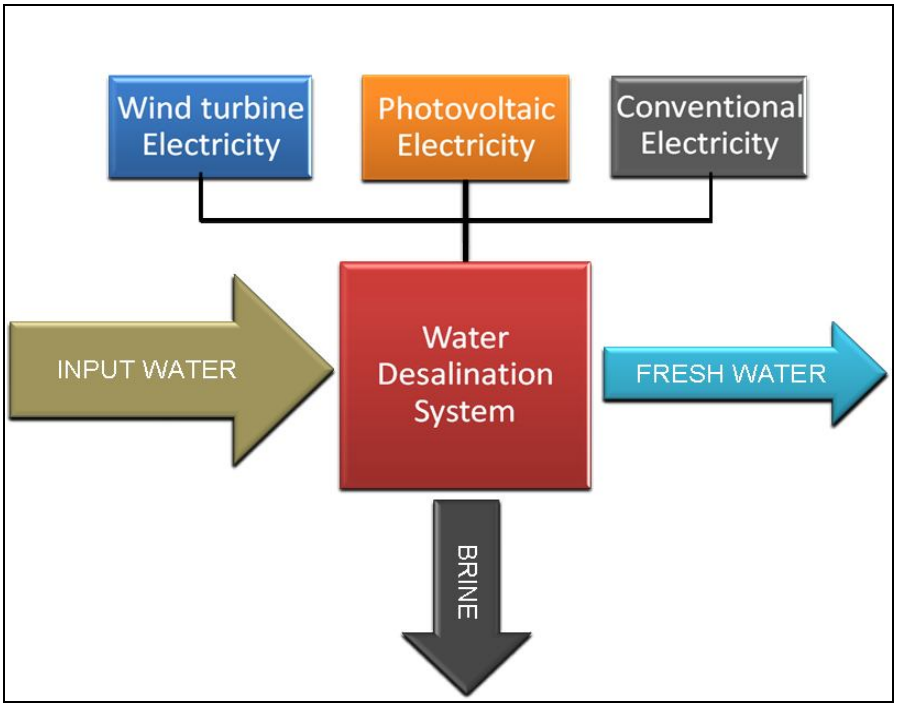
Στα τέλη της δεκαετίας του ’80, γεννήθηκε μεγάλο ενδιαφέρον για το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη. Πολλές μελέτες επικεντρώθηκαν στους εναλλακτικούς τρόπους περιορισμού των σχετικών με το φαινόμενο του θερμοκηπίου αερίων καθώς επίσης και τη διαχείριση των συνεπειών που θα προκαλούσε η υπερθέρμανση του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή.

Το κείμενο της Συνθήκης του Κιότο που επικυρώθηκε από τα κράτη μέλη της Ε.Ε. το 2002, υποσχόταν να αποτρέψει την ‘επικίνδυνη ανθρωπογόνο παρέμβαση στο κλιματικό σύστημα’ [1]. Με αυτό, οι χώρες της Ε.Ε. συμφωνούσαν να μειώσουν τις συνολικές εκπομπές των έξι πιο σημαντικών αερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 8% μέχρι το 2012, χρησιμοποιώντας ως βάση τις τιμές του 1990. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια στροφή προς τις περιβαλλοντικά φιλικές μορφές ενέργειας, καθώς τόσο η παραγωγή όσο και η χρήση ενέργειας είναι από τους κυριότερους παράγοντες που ευθύνονται για την ρύπανση του πλανήτη.

Η αφαλάτωση του νερού είναι μια διαδικασία ενεργοβόρα. Σήμερα, η πιο δημοφιλής μέθοδος αφαλάτωσης στα μικρά συστήματα είναι η αντίστροφη ώσμωση, μια τεχνική στην οποία αλμυρά διαλύματα νερού (υφάλμυρα η θαλασσινά) εξαναγκάζονται να περάσουν μέσα από μεμβράνες ώστε να μειωθεί η αλατότητά τους. Η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου φρέσκου νερού (συναντάται στην βιβλιογραφία ως specific energy consumption) εξαρτάται από την

αλατότητα του διαλύματος τροφοδοσίας και τον βαθμό απόδοσης της μονάδας αφαλάτωσης.

Οι πιο μικρές μονάδες αφαλάτωσης μπορούν να παράγουν σε καθημερινή βάση από ένα μέχρι και είκοσι κυβικά μέτρα. Η ποσότητα αυτή είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες ενός μικρού οικισμού σε πόσιμο νερό ή ακόμα και σε νερό για οικιακή χρήση. Ένας γρήγορος υπολογισμός για την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός m^3 είναι 4kWh, συνεπώς για την ημερήσια παραγωγή φρέσκου νερού θα χρειαζόταν μια μηχανή με ισχύ περίπου δύο με τρία kW. Βέβαια, τα συστήματα αφαλάτωσης με μεγαλύτερη δυναμικότητα σε παραγωγή φρέσκου νερού έχουν χαμηλότερη κατανάλωση που μπορεί να φτάνει ακόμα και τις 2,5 kWh/m^3 [2]. Παρόλα αυτά, όταν η ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ο ήλιος ή ο αέρας, επειδή η παραγωγή ενέργειας περιορίζεται στις ώρες που η πηγή ενέργειας είναι διαθέσιμη, απαιτούνται συστήματα αφαλάτωσης με μεγαλύτερη ισχύ. Επιπλέον, οι μονάδες αφαλάτωσης χρειάζονται και αποθηκευτικές εγκαταστάσεις για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης καθώς επίσης και ένα σύστημα διαχείρισης της άλμης, στοιχεία επιπλέον κόστους και τα δύο. Στην Εικόνα 8.1 περιγράφεται το μοντέλο αφαλάτωσης.



Εικόνα 8.1 Δομή μοντέλου αφαλάτωσης

8.3 Ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας

Πολλές μελέτες έχουν δημοσιευτεί σχετικά με τον υπολογισμό του κόστους αφαλάτωσης νερού όπως επίσης και την εκτίμηση της επίδρασης που έχει στο περιβάλλον η διαδικασία της αφαλάτωσης εστιάζοντας κυρίως στα χημικά και στο παχύρευστο διάλυμα της άλμης που αποβάλλεται. Έχουν γίνει επίσης μελέτες για τον υπολογισμό του κόστους αφαλατωμένου νερού λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές τιμές για το κόστος εκπομπής CO_2 [3]. Σε άλλη μελέτη, δυο διαφορετικά συστήματα συγκρίθηκαν, το ένα χρησιμοποιώντας ως νερό τροφοδοσίας υφάλμυρο νερό και το άλλο θαλασσινό. Βρέθηκε πως η περιβαλλοντική επίδραση του συστήματος που χρησιμοποιούσε υφάλμυρο νερό ήταν σημαντικά χαμηλότερη (σχεδόν η μισή) λόγω των χαμηλότερων ενεργειακών αναγκών του συστήματος [4].
Σε άλλες μελέτες, η εκτίμηση της επίδρασης διαφορετικών μεθόδων αφαλάτωσης αλλά και διαφορετικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας έχει

προχωρήσει ακόμα περισσότερο, όπου με χρήση μεθόδων εκτίμησης κύκλου ζωής (LCA) υπολογίζεται το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Έτσι σε μελέτες των Raluy et al. [5-8] συγκρίθηκαν οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι αφαλάτωσης (Εξάτμιση Πολλαπλών Βαθμίδων, Πολυβάθμια Εκρηκτική Εκτόνωση και Αντίστροφη Ώσμωση) και προέκυψαν τρία κύρια συμπεράσματα. Πρώτον, η περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με τη λειτουργία του συστήματος είναι η πιο σημαντική, πολύ μεγαλύτερη από την επιβάρυνση που οφείλεται στο στάδιο της κατασκευής του ή την επιβάρυνση του σταδίου της 'απόρριψης' του συστήματος, λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων της αφαλάτωσης. Επιπλέον, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης λόγω των χαμηλότερων ενεργειακών αναγκών της κατά 5-6 φορές σε σχέση με τις άλλες μεθόδους εμφανίζει τη μικρότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον. Τέλος, οι εκπομές αερίων που παράγονται από σύστημα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούσε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ακόμα και 70 φορές μικρότερες απ'ότι αν χρησιμοποιηθεί ενέργεια από ένα συμβατικό σύστημα παραγωγής.

8.4 Μεθοδολογία για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του κόστους του CO_2

Σήμερα, η κυριότερη πηγή ενέργειας για μικρές μονάδες αφαλάτωσης είναι η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Παρόλα αυτά, η παραγωγή της γίνεται σε μεγάλους σταθμούς και βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, συνεπώς η παραγωγή της ενέργειας συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές αερίων και γενικότερα επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Από την άλλη, η παραγωγή της είναι φτηνή και πρακτικά αδιάκοπη σε αντίθεση με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα ή ανεμογεννήτριες. Η λύση λοιπόν των αυτόνομων[3] συστημάτων αφαλάτωσης είναι πιο ακριβή, αλλά

[3] Αυτόνομα είναι τα συστήματα αφαλάτωσης που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλετροδότησης, αλλά χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

λιγότερο επιζήμια για το περιβάλλον και είναι θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος η σύγκριση κόστους-ωφελειών διαφορετικών συστημάτων αφαλάτωσης συνυπολογίζοντας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Όταν συγκρίνουμε διαφορετικές πηγές ενέργειας που τροφοδοτούν συστήματα αφαλάτωσης νερού είναι απαραίτητο να ενσωματώσουμε το κόστος του CO_2 στους υπολογισμούς του τελικού κόστους παραγωγής νερού. Ένας τρόπος να εισάγουμε το CO_2 στην αναλυσή μας είναι να προσθέσουμε το κόστος της μόλυνσης στο κόστος της διαδικασίας αφαλάτωσης όπως περιγράφεται στην παρακάτω ανισότητα όπου το αριστερό σκέλος δείχνει το συνολικό κόστος της αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ (συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους), ενώ το δεξί δείχνει το αντίστοιχο κόστος του συμβατικού συστήματος.

$$C_R + c_2 \times q_R < C_C + c_2 \times q_C$$

όπου C_R είναι το συνολικό κόστος αφαλάτωσης νερού με χρήση ΑΠΕ (€/m^3), C_C το κόστος αφαλάτωσης νερού με χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας (€/m^3), c_2 το εκτιμώμενο κόστος του CO_2 (€/τόννο), q_R η ποσότητα του παραγόμενου CO_2 από τη χρήση των ΑΠΕ (τόννοι/m^3) και q_C η ποσότητα του παραγόμενου CO_2 από τη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας (τόννοι/m^3).

Όταν τόσο το περιβαλλοντικό όσο και το χρηματοοικονομικό κόστος συνυπολογίζονται, τότε η μετάβαση από τις συμβατικές μορφές ενέργειας στις ανανεώσιμες είναι οικονομικά εφικτή κάθε φορά που ισχύει η παραπάνω ανισότητα. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός της οριακής τιμής του κόστους του CO_2 (δηλ. του c_2) πάνω από την οποία η χρήση των ΑΠΕ είναι χρηματοοικονομικά συμφέρουσα, μπορεί να γίνει λύνοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$c_2 = \frac{C_R - C_C}{q_C - q_R} \qquad (1)$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το κόστος ή η ποσότητα του CO_2 που παράγεται με χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας, τόσο πιο ελκυστική εμφανίζεται η χρήση των ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, όταν η διαφορά κόστους μεταξύ των ανανεώσιμων και των συμβατικών συστημάτων είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τη διαφορά των παραγόμενων ποσοτήτων CO_2 από τα δύο συστήματα, ή όταν η αξία του CO_2 ξεπεράσει αυτό το λόγο, τότε η λειτουργία των αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης γίνεται οικονομικά πιο συμφέρουσα.
Το συνολικό ετήσιο κόστος ενός συστήματος αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί συμβατικές μορφές ενέργειας αποτελείται από το κόστος της ίδιας της μονάδας αφαλάτωσης (ετήσιο ισοδύναμο κόστος) και από το κόστος του ηλεκτρισμού (η άλλης μορφής ενέργειας) που απαιτείται για την αφαλάτωση.

$$C_C = D_C \times a_{n,i}^{-1} + c_e \times q_e$$

όπου D_C είναι το κόστος αγοράς της μονάδας αφαλάτωσης που πρόκειται να χρησιμοποιήσει συμβατική μορφή ενέργειας (€/m^3), c_e το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh), q_e η ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m^3), i το επιτόκιο προεξόφλησης, n ο αριθμός των ετών της οικονομικής ζωής της μονάδας αφαλάτωσης D και $a_{n,i}$ ο συντελεστής της παρούσας αξίας ράντας $(1-(1+i)^{-n})/i$ για τον υπολογισμό του ετήσιου ισοδύναμου κόστους κεφαλαίου της μονάδας αφαλάτωσης.

8.4.1 Αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης

Το κόστος ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης νερού, δεν περιέχει κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επιβαρύνεται με το κόστος ενός γενικά πιο ισχυρού συστήματος αφαλάτωσης και το κόστος για την αγορά της μονάδας ΑΠΕ (R), η οποία απαιτείται για την εγκατάσταση.

$$C_R = D_R \times a_{n,i}^{-1} + R \times a_{r,i}^{-1}$$

όπου D_R είναι το κόστος αγοράς της μονάδας αφαλάτωσης που πρόκειται να χρησιμοποιήσει ΑΠΕ (€/m^3), R το κόστος αγοράς της ΑΠΕ (€/m^3) και r ο αριθμός των ετών της οικονομικής ζωής της ΑΠΕ.

Δεδομένου πως το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης θα λειτουργεί μόνο όταν είναι διαθέσιμη η ενέργεια από το σύστημα της ΑΠΕ, καθίσταται προφανές πως μια ισχυρότερη μονάδα αφαλάτωσης είναι απαραίτητη, ούτως ώστε να παράγεται σε ετήσια βάση η ίδια ποσότητα φρέσκου νερού. Για παράδειγμα, αν η ενέργεια από τις ΑΠΕ είναι διαθέσιμη στο 25% του χρόνου, τότε η μονάδα αφαλάτωσης πρέπει να είναι περίπου 4 φορές πιο ισχυρή σε σχέση με αυτή που θα χρησιμοποιούταν από μια μονάδα που χρησιμοποιεί ενέργεια προερχόμενη από ένα συμβατικό σύστημα.[4]

Τόσο το αυτόνομο όσο και το συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης απαιτούν για τη λειτουργία τους έξοδα συντήρησης και διάφορα άλλα έξοδα, η διαφορά των οποίων είναι συνήθως μικρή και για λόγους απλοποίησης παραλείπονται χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα η ακρίβεια των υπολογισμών[5].

---

[4] Το μέγεθος της ΑΠΕ (ηλιακό φωτοβολταϊκό η ανεμογεννήτρια) εξαρτάται από το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό. Εδώ, υποθέτουμε πως χρησιμοποιείται το κατάλληλο μέγεθος που ταιριάζει με την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης.

[5] Η αναφορά γίνεται για παρόμοιες ποσότητες αφαλάτωσης νερού και τοποθεσία εγκατάστασης. Γι' αυτό, κόστη που αφορούν σε χημικά, μεμβράνες, φίλτρα, εργασία, ασφάλεια και κάθε άλλο κόστος συντήρησης παρουσιάζουν μικρές διαφορές.

8.4.2 Υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης

Η περίπτωση στην οποία μια πρόσθετη ΑΠΕ προστίθεται σε ένα σύστημα αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από συμβατική μορφή ενέργειας, δικαιολογείται μόνο αν το κόστος της συμβατικής ενέργειας που εξοικονομείται είναι ικανό να καλύψει το κόστος που απαιτείται για την αγορά και εγκατάσταση της ΑΠΕ. (Αυτό ισχύει όχι μόνο για την αφαλάτωση νερού αλλά για κάε εφαρμογή σχετιζόμενη με την κατανάλωση ενέργειας.). Πρέπει δηλαδή να ισχύει

$$R \times a_{r,i}^{-1} < c_e \times q_e \times r_e ,$$

όπου r_e είναι το ποσοστό της ενέργειας που προέρχεται απο την ΑΠΕ. Στην περίπτωση αυτή το συνολικό κόστος ανα m^3 για την περίπτωση του υβριδικού συστήματος (C_H) είναι:

$$C_H = D_C \times a_{n,i}^{-1} + R \times a_{r,i}^{-1} + c_e \times q_e \times (1 - r_e)$$

Σημείωση: Αν η ΔΕΗ αγοράζει την ενέργεια που παράγεται απο ΑΠΕ σε τιμή μεγαλύτερη απο το κόστος παραγωγής (απο τη μονάδα ΑΠΕ), είναι συμφέρουσα η επένδυση σε μεγάλα συστήματα ΑΠΕ τα οποία κερδίζουν απο την πώληση όλης της περισσευούμενης ενέργειας στη ΔΕΗ. Στην περίπτωση δε που η τιμή αγοράς της ενέργειας προερχόμενης απο ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη απο το c_e, είναι προτιμότερο να πωλείται όλη η παραγόμενη ενέργεια από την ΑΠΕ και να το σύστημα αφαλάτωσης να λειτουργεί με το πιο φτηνό να αγοραστεί, ρεύμα απο το δίκτυο. Στην Ελλάδα σήμερα, η αγορά ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά πωλείται στη ΔΕΗ προς 0,45€/kWh (συγκρινόμενο με τη μέση χρέωση λογαριασμού που

είναι 0,08€/kWh), αλλά αυτή η επιδότηση δεν αναμένεται να διαρκέσει πολύ.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, συστήματα αφαλάτωσης νερού εγκαθίστανται σε περιοχές όπου το οριακό κόστος του νερού είναι αρκετά υψηλό ώστε να δικαιολογεί την εγκατάσταση τους. Για παράδειγμα, σε πολλά νησιά του Αιγαίου οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι είναι ανεπαρκείς και η ζήτηση ικανοποιείται με μεταφορά νερού που έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Με την υπάρχουσα τεχνολογία η αφαλάτωση νερού είναι σε πολλές περιπτώσεις οικονομικά συμφέρουσα και ως αποτέλεσμα υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός μεσαίων και μεγάλων μονάδων αφαλάτωσης σε ολόκληρο τον πλανήτη.

Για να εξεταστεί η πιθανότητα εγκατάστασης συστημάτων αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ, θεωρούμε την κατάσταση στην οποία το σύστημα αφαλάτωσης αναμένεται να ικανοποιήσει μέρος της ζήτησης σε νερό και πως όλο το νερό που παράγεται καταναλώνεται από τον τοπικό πληθυσμό. Σε αυτή την περίπτωση, η συνθήκη οικονομικής βιωσιμότητας του αυτόνομου συστήματος όπως καθορίζεται στη σχέση (1) είναι:

$$c_2 > \frac{\left(D_R \times a_{n,i}^{-1} + R \times a_{r,i}^{-1}\right) - \left(D_C \times a_{n,i}^{-1} + c_e \times q_e\right)}{q_C - q_R} \qquad (2)$$

Με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων μοντέλων, όπως για παράδειγμα το AUDESSY[6], είναι πιθανό να εκτιμηθεί το μέγεθος του απαιτούμενου εξοπλισμού, D_R, D_C και R όπως επίσης και η ενέργεια που χρειάζεται σε κάθε περίπτωση.

[6] Το AUDESSY είναι ένα εργαλείο υποστήριξης απόφασης το οποίο υπολογίζει με αρκετή ακρίβεια το μέγεθος μιας μονάδας αφαλάτωσης ανάλογα με τις ανάγκες σε φρέσκο νερό. όπως επίσης και το κόστος των συστημάτων αφαλάτωσης με ή χωρίς χρήση ΑΠΕ. Το λογισμικό αυτό έχει δημιουργηθεί από το Γ.Π.Α. στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος ADIRA.

Στη συνέχεια δίνονται στοιχεία για τον υπολογισμό των όρων της ανισότητας σχετικών με τις εκπομπές CO_2.

8.5 Εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με διαφορετικές πηγές ενέργειας

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρισμού απελευθερώνουν CO_2 και άλλα αέρια του θερμοκηπίου όχι μόνο κατά τη λειτουργία τους, αλλά και κατά τη διάρκεια της παραγωγής των εξαρτημάτων τους, οπως επίσης και τη μεταφορά στο σημείο που είναι εγκατεστημένοι. Η μέθοδος LCA (Life Cycle Assessment) υιοθετείται συνήθως για την εκτίμηση της συνολικής παραγωγής CO_2 ή όπως πιο συχνά αναφέρεται ισοδύναμου CO_2 (CO_2-eq[7]) ανά μονάδα παραγόμενου ηλεκτρισμού. Στην περίπτωση των συστημάτων ΑΠΕ (όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες), τα οποία δεν παράγουν ρύπους κατά τη λειτουργία τους, το περιβαλλοντικό τους βάρος αφορά μόνο στο στάδιο της κατασκευής και μεταφοράς των εξαρτημάτων τους.

8.5.1 Εκπομπές από σταθμούς καύσης πετρελαίου

Η καύση πετρελαίου είναι ευρύτατα διαδεδομένη στα ελληνικά νησιά. Οι εκτιμήσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση πετρελαίου μπορούν να φτάσουν ακόμα και τα 942 γρ.CO_2-eq /kWh [9]. Σε άλλες αναφορές επισημαίνεται πως οι εκπομπές ρύπων για έναν σταθμό πετρελαίου μπορούν να φτάσουν τα 880 γρ.CO_2-eq /kWh ενώ υπαρχουν και ακόμα χαμηλότερες εκτιμήσεις της τάξης των 742 γρ.CO_2-eq /kWh [10].

[7] Το "ισοδύναμο CO_2 " (CO_2-eq) υπολογίζεται βασιζόμενο στο δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης των αερίων του θερμοκηπίου. Τα έξι αέρια που το αποτελούν σύμφωνα με το UNFCC είναι τα ακόλουθα: CO_2, CH_4, N_20, HFCs, PFCs, SF_6.

8.5.2 Εκπομπές από φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αισθητά χαμηλότερη επίπτωση στο περιβάλλον. Οι εκπομπές ρύπων για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανάλογα με το υλικό που είναι κατασκευασμένα μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 21 και 43 gr CO_2-eq /kWh [11]. Σε άλλες περιπτώσεις εκτιμήθηκε η παραγωγή CO_2 σε 41,7 gr /kWh [12]. Γενικά, οι εκτιμήσεις κυμαίνονται γύρω από αυτή την τιμή με τον Jungbluth να δίνει ένα μεγαλύτερο εύρος από 39 μέχρι 110 gr CO_2-eq /kWh [13] και άλλους να αναφερουν μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ 26 και 53 gr CO_2-eq /kWh λόγω διαφορετικής ποσότητας χρησμοποιούμενου πυριτίου [10]. Σε άλλες εργασίες αναφέρεται πως οι εκπομπές CO_2 για παραγωγή ενέργειας με χρήση φωτοβολταϊκών είναι περίπου είκοσι φορές μικρότερη απ'ότι αν χρησιμοποιείτο μηχανή καύσης πετρελαίου [14]. Τέλος από τις πιο υψηλές τιμές που έχουν αναφερθεί είναι αυτή των 104 gr CO_2-eq /kWh με χρήση πολυπυριτικού συστήματος [15].

8.5.3 Εκπομπές από ανεμογεννήτριες

Οι εκπομπές αερίων από τη χρήση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ενέργειας είναι χαμηλότερες από αυτές των φωτοβολταϊκών. Στην εργασία του Lenzen, μελετήθηκαν διαφορετικές εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών και βρέθηκε πως οι εκπομπές για την παραγωγή ενέργειας με αυτό τον τρόπο είναι ανάμεσα σε 7,9 και 123,7 gr CO_2-eq /kWh, λόγω διαφορών σε παραμέτρους όπως η διάρκεια ζωής, ο συντελεστής φορτίου, ακόμα και οι διαφορές στο μίγμα παραγωγής καυσίμου ανάμεσα σε διαφορετικές χώρες [16]. Οι περισσότερες εκτιμήσεις είναι πιο κοντά στη χαμηλότερη τιμή με τον Jungbluth να δίνει σε απόλυτες τιμές τις εκπομπές αερίων σε 13 gr CO_2-eq /kWh για ανεμογεννήτρια 2 MW ενώ για μικρότερες με δυναμικότητα 800 kW δίνεται τιμή στα 11 gr CO_2-eq /kWh [17]. Άλλοι

ερευνητές εκτίμησαν τις εκπομπές για διαφορετικά αιολικά πάρκα σε ένα εύρος μεταξύ 9,7 και 16,5 gr CO_2-eq /kWh [18] και σε άλλες περιπτώσεις λίγο υψηλότερα φτάνοντας τα 29,5 gr CO_2-eq /kWh [10]. Επιπλέον, σε άλλες περιπτώσεις, για διαφορετικό μέγεθος και τοποθεσία εγκατάστασης εκτιμήθηκε εύρος 9 με 11 gr CO_2-eq /kWh [15] ή και λίγο πιο πάνω στα 14,8 gr CO_2-eq /kWh [19]. Τέλος υπάρχουν αναφορές για πολύ πιο χαμηλές τιμές όπου σε πολύ ιδανικές συνθήκες το περιβαλλοντικό βάρος τόσο για την παραγωγή όσο και λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να είναι τόσο χαμηλό όσο 2 gr CO_2-eq /kWh [20].

8.5.4 Εκπομπές από σταθμούς καύσης άνθρακα

Ο άνθρακας αποτελεί κυρίαρχη πηγή ενέργειας στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού. Υπάρχουν εκτιμήσεις που δίνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της καύσης του άνθρακα σε περίπου 870 gr CO_2-eq /kWh [21] με 880 gr CO_2-eq /kWh [22]. Άλλες εκτιμήσεις είναι υψηλότερες της τάξης των 975 gr CO_2-eq /kWh[10] ή ακόμα και 1000 gr CO_2-eq /kWh [9]. Σε άλλες μελέτες δίνεται ένα εύρος μεταξύ των 850 και 1000 gr CO_2-eq /kWh [23] ενώ οι υψηλότεροι υπολογισμοί για εκπομπές από καύση άνθρακα φτάνουν τα 1.186 gr CO_2-eq /kWh [24]. Φυσικά, ο τύπος, η καθαρότητα αλλά και η μέθοδος καύσης του άνθρακα έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του επιπέδου μόλυνσης. Στον πίνακα 8.1 συνοψίζονται οι εκπομπές από διαφορετικές πηγές ενέργειας.

Πίνακας 8.1 Εκπομπές CO_2 από διαφορετικές πηγές ενέργειας

Τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας	Εκπεμπόμενα αέρια (gCO_2/kWh)	Πηγή
Σταθμοί καύσης πετρελαίου	742	[10]
	880	[13]
	942	[9]
Φωτοβολταϊκά συστήματα	21-43	[11]
	41.7	[12]
	26-53.4	[10]
	39-110	[13]
	104	[15]
Ανεμογεννήτριες	2	[20]
	9-11	[15]
	11-13	[17]
	14.8	[19]
	9.7-16.5	[18]
	29.5	[10]
	7.9-123.7	[16]
Σταθμοί καύσης άνθρακα	870	[21]
	880	[22]
	975	[10]
	850-1,000	[23]
	1,000	[9]
	1,186	[24]

8.6 Οι εκπομπές CO_2 από μονάδες αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά

Οι εκπομπές CO_2 που αναφέρονται παραπάνω περιλαμβάνουν μόνο το σύστημα παραγωγής ενέργειας και όχι το σύστημα αφαλάτωσης. Για να παρουσιαστούν πιο ακριβείς εκτιμήσεις για τις συνολικές εκπομπές ενός συστήματος αφαλάτωσης, είναι αναγκαίο να γίνει μια εκτίμηση κύκλου ζωής (LCA) όταν αυτό συνδέεται με διαφορετικές μορφές ενέργειας. Μια εκτίμηση για τις εκπομπές CO_2 δόθηκε στο Κεφάλαιο 8. Αφορά σε μονάδα αφαλάτωσης τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης, η οποία συνδυάζεται με διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού. Ο Πίνακας 8.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα της LCA για συστήματα αφαλάτωσης στον ελληνικό νησιωτικό χώρο.

Πίνακας 8.2 Εκπομπές CO_2 για την αφαλάτωση νερού

	Εκπομπές CO_2 (gr/kWh)
Αφαλάτωση - Δίκτυο	913 – 940[8]
Αφαλάτωση - Ανεμογεννήτρια	24
Αφαλάτωση - Φωτοβολταϊκά	150

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα οι εκπομπές CO_2 είναι γύρω στα 925 gr ανά kWh χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Όταν η τροφοδοσία γίνεται με φωτοβολταϊκά τότε οι εκπομπές μειώνονται κατά πολύ, σε 150 gr/kWh, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ανεμογεννήτριες τότε η συνολική επιβάρυνση του περιβάλλοντος είναι ακόμα μικρότερη.

[8] Οι δύο διαφορετικές τιμές έχουν υπολογιστεί για μονάδες αφαλάτωσης διαφορετικού μεγέθους και εγκατεστημένες σε διαφορετικά νησιά

8.7 Το κόστος παγίδευσης και αποθήκευσης του CO_2

Η παγίδευση και αποθήκευση του CO_2 είναι μια μέθοδος μείωσής του και καθυστέρησης της κλιματικής αλλαγής. Το κόστος της μεθόδου αποτελεί σημείο αναφοράς, καθώς είναι το κόστος που βαρύνει μια ρυπογόνο διεργασία όπως είναι η παραγωγή ενέργειας με καύση άνθρακα ώστε αυτή να καταστεί πιο φιλική προς το περιβάλλον. Με καθαρά οικονομικά κριτήρια, δείχνει το σημείο μέχρι το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιούμε μια λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο δηλαδή πόσο πρέπει να είναι το παραπάνω κέρδος από την παραγωγή συμβατικής μορφής ενέργειας προτού γίνει στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η παγίδευση και αποθήκευση του CO_2 είναι μια διαδικασία τριών βημάτων που περιλαμβάνει [25]:

- Την παγίδευση του CO_2 από εργοστάσια, βιομηχανικές πηγές και πηγές φυσικού αερίου με υψηλό ποσοστό σε εκπομπές CO_2
- Τη μεταφορά μέσω αγωγού στο μέρος που πρόκειται να αποθηκευτεί και
- Τη γεωλογική αποθήκευση σε βαθείς αλατώδεις σχηματισμούς, σε πρωήν πεδία πετρελαίου ή αερίου που έχουν εξαντληθεί, ανεξόρυκτα κοιτάσματα άνθρακα κλπ.

Το 2005, η διακυβερνητική επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (IPCC), αποτελούμενη από επιστήμονες που συμβουλεύουν τα Ηνωμένα Έθνη για την υπερθέρμανση του πλανήτη, υπολόγισε πως το κόστος της μείωσης του CO_2 μέσω της διαδικασίας παγίδευσης και αποθήκευσης του CO_2 κυμαίνεται από 14-91$ για κάθε τόνο CO_2 [26]. Ένα χρόνο αργότερα η Διεθνής Αντιπροσωπεία για την Ενέργεια εκτίμησε πως το ίδιο κόστος για τα πρώτα μεγάλα εργοστάσια θα κυμαινόταν μεταξύ 30 και 90$ ανά τόνο CO_2 ή ακόμα και περισσότερο, ανάλογα με την χρησιμο- ποιούμενη τεχνολογία, την καθαρότητα του CO_2 αλλά και την τοποθεσία [25]. Η εταιρεία

συμβούλων McKinsey έχει εκτιμήσει πως το κόστος αυτό κυμαίνεται μεταξύ 60 και 90$/ τόνο CO_2 που αποφεύγεται. Παρόλα αυτά, διαφαίνεται πως η τιμή αυτή θα είναι αρκετά χαμηλότερη όταν η σχετική τεχνολογία ωριμάσει και μέχρι το 2030 οι εκτιμήσεις της είναι πως το κόστος θα πέσει στα 30-45$/ τόνο CO_2 [27]. Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη που έγινε στο Harvard University, βρέθηκε πως το αρχικό κόστος για κάθε τόνο CO_2 που αποφεύγεται είναι γύρω στα 150$ [28].

Πέρα από τις εκτιμήσεις Διεθνών Οργανισμών και Πανεπιστημίων, έχουν δημοσιευτεί και αρκετά άρθρα σχετικά με το θέμα αυτό. Οι Singh et al. συνέκριναν δυο διαφορετικές τεχνολογίες απομάκρυνσης του CO_2. Όταν το CO_2 διαχωρίζεται από τα προϊόντα της καύσης χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους το κόστος παγίδευσης είναι 53 $/ τόνο CO_2. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πιο προηγμένες μέθοδοι, τότε το κόστος πέφτει ακόμα περισσότερο στα 35$/ τόνο CO_2 που αποφεύγεται [29]. Άλλες εκτιμήσεις δίνουν το κόστος της παγίδευσης μεταξύ 13 και 74$/ τόνο CO_2 [30] ενώ σε άλλη μελέτη το κόστος αυτό υπολογίζεται σε 33$/ τόνο CO_2 που αποφεύγεται [31]. Τέλος, οι Gibbins και Chalmers εξέτασαν διαφορετικές περιπτώσεις για την απομάκρυνση του CO_2. Βρέθηκε πως για εργοστάσια καύσης αερίου το κόστος της μείωση του CO_2 κυμαίνεται μεταξύ 58 και 112$/ τόνο CO_2 που αποφεύγεται, ενώ για εργοστάσια που καίνε άνθρακα το κόστος αυτό, λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας παγίδευσης του CO_2 που χρησιμοποιείται, πέφτει στα 23 με 36$/ τόνο CO_2 [32].

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνεται πως υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στον υπολογισμό του κόστους παγίδευσης και αποθήκευσης του CO_2. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις παρακάτω αιτίες:

- Στα διαφορετικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας
- Στη διαφορετική χρονική περίοδο που χτίστηκε το εργοστάσιο
- Στην τοποθεσία
- Στον διαφορετικό εξοπλισμό που μπορεί να χρησιμοποιείται

- Στους διαφορετικούς υπολογισμούς κόστους, όπως π.χ. σε πολλές μελέτες υπολογίζεται το κόστος παγίδευσης του CO_2 αλλά όχι η μεταφορά και η αποθήκευσή του.

8.8 Υπολογισμός ελάχιστης τιμής του CO_2 για χρήση φωτοβολταϊκών

Έχοντας εκτιμήσει την ανισότητα που θα μας βοηθήσει στον υπολογισμό της οριακής τιμής των εκπομπών CO_2 (2), αλλά και έχοντας πληροφορίες σχετικά με τις εκπομπές αερίων του CO_2 για χρήση διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων, είναι τώρα εφικτό να υπολογίσουμε το CO_2 για ένα μικρό σύσημα αφαλάτωσης, σαν αυτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μικρού μεγέθους ελληνικό, άνυδρο νησί, για την κάλυψη των αναγκών του πληθυσμού του σε φρέσκο, πόσιμο νερό.
Για τις Ελληνικές συνθήκες ηλιοφάνειας, 10 kWp φωτοβολταϊκών κυψελών είναι σε θέση να παράγουν κατά μέσο όρο 15.000 kWh ετησίως [33]. Έχοντας κατά νου πως οι ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή 1 m^3 φρέσκου νερού είναι 4kWh, η ονομαστική ποσότητα νερού που μπορεί να παραχθεί είναι 15.000/4 = 3.750 m^3 ή συνυπολογίζοντας τον απαιτούμενο χρόνο συντήρησης αλλά και το ποσοστό διαθεσιμότητας, θεωρούμε πως η παραγόμενη ποσότητα είναι μικρότερη και γύρω στα 3.500 m^3. Στην περίπτωση αυτή, το απαιτούμενο σύστημα αφαλάτωσης πρέπει να έχει δυναμικότητα παραγωγής 2,5 m^3/ώρα. Αν χρησιμοποιηθεί βέβαια ενέργεια από το δίκτυο ηλεκτροδότησης, το οποίο έχει συνεχή και αδιάκοπη παροχή ενέργειας, είναι αρκετό ένα σύστημα αφαλάτωσης δυναμικότητας 0,6 m^3/ώρα. Στον Πίνακα 8.3 φαίνονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2.
Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην ανισότητα (2), βρίσκουμε πως για να είναι συμφέρουσα από οικονομικής απόψεως η χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών σε μια μονάδα αφαλάτωσης αντί των συμβατικών μορφών

ενέργειας, η τιμή του CO_2 πρέπει να είναι υψηλότερη από 28€/m^3. Στον υπολογισμό αυτόν έχει συμπεριληφθεί και επιδότηση 30% για τις ΑΠΕ σύμφωνα με το νόμο 3299/2004 [34].

Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις χρηματοοικονομικές ποινές που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση στις επιχειρήσεις που ξεπερνούν την ετήσια ποσόστωση σε CO_2-eq που τους αντιστοιχεί και η οποία έχει καθοριστεί σε 100€ / τόννο CO_2 [35]. Είναι επίσης αρκετά χαμηλότερη από το κόστος που απαιτείται για την παγίδευση και αποθήκευση του CO_2 που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ενώ για το ίδιο κόστος αξίζει να σημειωθεί πως το U.S. Department of Energy δίνει τιμή γύρω στα 150$ / τόννο CO_2 [36].

Πίνακας 8.3 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2 όταν χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα

	Αξία	Πηγή
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών δυναμικότητας 10 kW χωρίς επιδότηση	50.000€	[37]
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης (2,5m^3/ ώρα)	35.000€	[37]
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης (0,6m^3/ ώρα)	15.000€	[37]
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής φωτοβολταϊκών	25 χρόνια	[37]
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μονάδας αφαλάτωσης	20 χρόνια	[37]
Χρησιμοποιούμενο επιτόκιο	5%	
Ετήσια παραγωγή ρεύματος (ανά kW)	1.500	[33]
Κατανάλωση μονάδας αφαλάτωσης	4 kWh/m^3	
Ετήσια παγωγή νερού	3.500 m^3	
Κόστος ηλεκτρικού ρεύματος	0,27 €/kWh	[38]
Εκπομπές αερίων από φωτοβολταϊκά	150 g CO_2-eq/kWh	[39]
Εκπομπές αερίων από σταθμούς παραγωγής ενέργειας*	925 g CO_2-eq/kWh	[39]

* όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά νησιά

Το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφοράς και διανομής της (0,27€ /kWh) έχει υπολογιστεί από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας και αναφέρεται σε τοπική παραγωγή ενέργειας νησιών μικρού μεγέθους [38]. Παρόλα αυτά υπάρχουν άλλες εκτιμήσεις για μεσαία και μικρού μεγέθους νησιά οι οποίες είναι ανάμεσα σε 0,15 και 0,40€ / kWh. Για να δούμε λοιπόν τις επιπτώσεις στην οριακή τιμή του CO_2 χρησιμοποιούμε διαφορετικές τιμές ενεργειακής κατανάλωσης της μονάδας αφαλάτωσης καθώς επίσης και διαφορετικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και μελετούμε τα αποτελέσματα. Ο Πίνακας 8.4 δείχνει τη μεταβολή στην οριακή τιμή του CO_2 για διαφορετικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 8.4 Οριακές τιμές CO_2 ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά για διαφορετικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

		ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (kWh/ m³)	
		3	*4*
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh)	*0,150*	319,13	183,24
	0,270	159,13	28,40
	0,292	129,80	0,02
	0,390	-0,84	-126,43

Σε μεσαία και μεγάλου μεγέθους νησιά του Αιγαίου, με χαμηλό σχετικά κόστος παραγωγής ενέργειας (0,15€/kWh), η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 είναι 183€/m³. Από την άλλη, σε μικρότερα νησιά με μεγαλύτερο κόστος παραγωγής ενέργειας (0,27 € /kWh), η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 πέφτει στα 28€/m³. Αξίζει να σημειωθεί πως για κόστος παραγωγής ενέργειας μεγαλύτερο από 0,29€/kWh, η εγκατάσταση αυτόνομης μονάδας αφαλάτωσης με χρήση φωτοβολταϊκών είναι συμφέρουσα χωρίς καν να λάβουμε υπόψη τις εκπομπές των αερίων. Οι μηδενικές και αρνητικές τιμές στον Πίνακα 8.3 υποδηλώνουν ακριβώς το παραπάνω συμπέρασμα.

Τέλος, φαίνεται πως όσο μειώνονται οι απαιτήσεις της μονάδας αφαλάτωσης σε ενέργεια (άρα και σε εκπομπές CO_2) τόσο μεγαλύτερη είναι και η οριακή τιμή του CO_2 ώστε να γίνει υποκατάστασή του συμβατικού τρόπου παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

8.9 Υπολογισμός ελάχιστης τιμής του CO_2 για χρήση ανεμογεννητριών

Το αιολικό δυναμικο στα νησιά του Αιγαίου είναι σημαντικό και οι ανεμογεννήτριες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια οι πιο δημοφιλείς μηχανές εκμετάλλευσης των καιρικών φαινομένων. Στις παράκτιες περιοχές η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι περίπου 4-5 m/s, ενώ στα νησιά του Αιγαίου έχει υπολογιστεί πως μια μέση τιμή είναι τουλάχιστον 5,3 m/s, ενώ μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τα 7,5 m/s [40]. Με τη χρησιμοποίηση ειδικού λογισμικού για τον υπολογισμό της ποσότητας του ηλεκτρισμού που παράγεται με δεδομένες συνθήκες ανέμου και περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, υπολογίστηκε πως η μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για ταχύτητα ανέμου 5,3 m/s είναι 1.570 kWh για κάθε 1 kW εγκατεστημένης δυναμικότητας [41]. Για ένα σύστημα που παράγει παρόμοια ποσότητα νερού με το σύστημα της προηγούμενης παραγράφου (3.500m^3/έτος) απαιτείται η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας δυναμικότητας περίπου 9 kW. Στον Πίνακα 8.5 δίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2.

Πίνακας 8.5 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του CO_2 όταν χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες

	Αξία	Πηγή
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης ανεμογεννήτριας δυναμικότητας 9kW χωρίς επιδότηση (30%)	12.000€	[37]
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης (2,33m^3/ ώρα)	35.000€	[37]
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης (0,58m^3/ ώρα)	15.000€	[37]
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας	20 χρόνια	[37]
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μονάδας αφαλάτωσης	20 χρόνια	[37]
Χρησιμοποιούμενο επιτόκιο	5%	
Μέση ταχύτητα ανέμου	5,3 m/sec	[40]
Ετήσιες ώρες λειτουργίας	1.570 hr	[41]
Κατανάλωση μονάδας αφαλάτωσης	4 kWh/m^3	
Ετήσια παραγωγή νερού	3.500 m^3	
Κόστος ηλεκτρικού ρεύματος	0.27 €/kWh	[38]
Εκπομπές αερίων από ανεμογεννήτριες	24 g CO_2-eq./kWh	[39]
Εκπομπές αερίων από σταθμούς παραγωγής ενέργειας*	925 g CO_2-eq./kWh	[39]

* όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά νησιά

Αντικαθιστώντας όλες τις παραπάνω τιμές στην ανισότητα (2) βρίσκουμε πως η οριακή τιμή για το CO_2 είναι αρνητική σε όλες τις περιπτώσεις που το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερο απο 0,16 €/kWh. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει πως η παραγωγή ρεύματος με χρήση ανεμογεννήτριας είναι ούτως ή άλλως πιο οικονομική από την καύση πετρελαίου στα νησιά, ακόμα και χωρίς να συμπεριληφθεί το περιβαλλοντικό όφελος. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο χαμηλό κόστος αγοράς που έχουν οι ανεμογεννήτριες και είναι ο λόγος για τον οποίο η πλειονότητα των επενδύσεων σε ΑΠΕ στη χώρα μας κατευθύνεται κυρίως προς την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας [42]. Για κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο τόσο χαμηλό όσο 0,15 €/kWh, η εγκατάσταση της

ανεμογεννήτριας είναι οικονομικά συμφέρουσα αν συμπεριληφθεί και το περιβαλλοντικό όφελος και για τιμή CO_2 μεγαλύτερη από 14,18€/m^3 ή 74,40€/m^3 ανάλογα με την κατανάλωση της μονάδας αφαλάτωσης. Όπως έχει ήδη σχολιαστεί και στην προηγούμενη παράγραφο, οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα χαμηλές καθώς η παραγματική αξία του CO_2 είναι κοντά στα 100 €/ τόννο. Ο Πίνακας 8.6 δείχνει τη μεταβολή στην οριακή τιμή του CO_2 για διαφορετικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 8.6 Οριακές τιμές CO_2 ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από ανεμογεννήτριες για διαφορετικό κόστος συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

		ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (kWh/m^3)	
		3	*4*
Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh)	*0,150*	74,40	14,18
	0,163	59,97	-0,25
	0,217	0,04	-60,18
	0,270	-58,78	-119,00

8.10 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό υπολογίστηκε η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2, για την οποία είναι δυνατή η μετάβαση από τα συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν συμβατικές μορφές ενέργειας και χρησιμοποιούνται σήμερα (καύσης πετρελαίου) σε συστήματα αφαλάτωσης νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Βρέθηκε πως για να αντικατασταθούν οι συμβατικές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φρέσκου νερού στα ελληνικά νησιά, παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις στην οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 για διαφορετικά κόστη παραγωγής συμβατικής ενέργειας και

διαφορετική κατανάλωση της εκάστοτε μονάδας αφαλάτωσης. Η αιολική ενέργεια, λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού και των χαμηλότερων περιβαλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψην όταν εγκαθίσταται ένα καινούργιο σύστημα αφαλάτωσης. Αυτό, όχι μόνο λόγω της πιο μικρής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, αλλά και λόγω του γεγονότος πως το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση ανεμογεννητριών είναι μικρότερο από το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα σε μικρά και μεσαίου μεγέθους νησιά.

Σήμερα, υπάρχει ένας σχετικά μικρός αριθμός μονάδων αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά. Οι περισσότερες από αυτές λειτουργούν με ηλεκτρισμό από το δίκτυο αν και το ρεύμα που προέρχεται από ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι φθηνότερο. Αυτό συμβαίνει διότι η χρήση ηλεκτρικού από το δίκτυο είναι η 'βολική' λύση, επειδή δεν απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις και υπάρχει πάντα δυνατότητα να προστεθεί αργότερα μια ανεμογεννήτρια. Επιπλέον, αν και το πραγματικό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού στα ελληνικά νησιά είναι σχετικά ψηλό, αυτό δεν αντικατοπτρίζεται στο λογαριασμό που πληρώνουν οι ιδιώτες, καθώς η ΔΕΗ χρηματοδοτεί το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος στα νησιά, οπότε σε αρκετές περιπτώσεις η ενέργεια που παράγεται απο ανεμογεννήτριες είναι οικονομικά λιγότερο ελκυστική.

Ακόμα όμως και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά συστήματα, η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 είναι πολύ κοντά σε αυτές που υπολογίζονται για την παγίδευση και αποθήκευση των ρύπων και σε πολλές περιπτώσεις μικρότερη από τις χρηματοοικονομικές ποινές που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Καθίσταται επίσης σαφές πως για υψηλές τιμές κόστους παραγωγής ενέργειας (πάνω από 0,29 €/kWh) όπως συμβαίνει σε πολλά μικρά ελληνικά νησιά, η επιλογή των ΑΠΕ για παραγωγή φρέσκου νερού καθίσταται μονόδρομος ακόμα και χωρίς να ληφθεί υπόψην το περιβαλλοντικό τους πλεονέκτημα.

8.11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. UNFCCC, *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* 1998, UNITED NATIONS.
2. SYCHEM, S.A., *Private Communication.* 2007.
3. Agashichev, S.P. and A.M. El-Nashar, *Systemic approach for techno-economic evaluation of triple hybrid (RO, MSF and power generation) scheme including accounting of CO2 emission.* Energy, 2005. **30**: p. 1283-1303.
4. Munoz, I. and A.R. Fernandez-Alba, *Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources.* Water Research, 2008. **42**: p. 801-811.
5. Raluy, G., L. Serra, and J. Uche, *Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies.* Energy, 2006. **31**: p. 2361-2372.
6. Raluy, R.G., L. Serra, and J. Uche, *Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies.* Desalination, 2005. **183**: p. 81-93.
7. Raluy, R.G., L. Serra, and J. Uche, *Life Cycle Assessment of Water Production Technologies - Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO).* Int. J. Life Cycle Assess., 2005. **10**(4): p. 285-293.
8. Raluy, R.G., et al., *Life-cycle assessment of desalination technologies integrated with energy production systems.* Desalination, 2004. **167**: p. 445-458.
9. Stoppato, A., *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation.* Energy, 2008. **33**: p. 224-232.
10. Hondo, H., *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 2005. **30**: p. 2042-2056.

11. Fthenakis, V.M., H.C. Kim, and E. Alsema, *Emissions from Photovoltaic Life Cycles.* Environmental Science & Technology, 2008. **42**: p. 2168-2174.
12. Bernal-Agustin, J.L. and R. Dufo-Lopez, *Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain.* Renewable energy, 2006. **31**: p. 1107-1128.
13. Jungbluth, N., *Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss ecoinvent Database.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005. **13**: p. 429-446.
14. Koroneos, C., N. Stylos, and N. Moussiopoulos, *LCA of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Systems. Part 2: Application on an Island Economy.* Int. J. Life Cycle Assess., 2006. **11**(3): p. 183-188.
15. Pehnt, M., *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable energy, 2006. **31**: p. 55-71.
16. Lenzen, M. and J. Munksgaard, *Energy and CO_2 life-cycle analyses of wind turbines - review and applications.* Renewable energy, 2002. **26**: p. 339-362.
17. Jungbluth, N., et al., *Life Cycle Asessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power.* Int. J. Life Cycle Assess., 2005. **10**: p. 24-34.
18. Schleisner, L., *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities.* Renewable energy, 2000. **20**: p. 279-288.
19. Ardente, F., et al., *Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**: p. 200-217.
20. Lenzen, M. and U. Wachsmann, *Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment.* applied energy, 2004. **77**: p. 119-130.

21. Raghuvanshi, S.P., A. Chandra, and A.K. Raghav, *Carbon dioxide emissions from coal based power generation in India.* Energy Conversion & Management, 2006. **47**: p. 427-441.
22. Denny, E. and M. O'Malley, *The impact of carbon prices on generation-cycling costs.* Energy Policy, 2009. **37**: p. 1204-1212.
23. Franco, A. and A.R. Diaz, *The future of challenges for 'clean coal technologies': Joining efficiency increase and pollutant emission control.* Energy, 2009. **34**: p. 348-354.
24. Wang, H. and T. Nakata, *Analysis of the market penetration of clean coal technologies and its impacts in China's electricity sector.* Energy Policy, 2009. **37**: p. 338-351.
25. IEA, *CO2 capture & Storage.* IEA Energy Technology Essentials, 2006.
26. IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage.* Cambridge University Press, 2005: p. p.347.
27. McKinsey&Company, *Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics.* 2008.
28. Al-Juaied, M. and A. Whitmore, *'Realistic Costs of Carbon Capture' Discussion Paper 2009-08.* Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, 2009.
29. Singh, D., et al., *Techno-economic study of CO2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O2/CO2 recycle combustion.* Energy Conversion & Management, 2003. **44**: p. 3073-3091.
30. Rubin, E.S., C. Chen, and A.B. Rao, *Cost and performance of fossil fuel power plants with CO2 capture and storage.* Energy Policy, 2007. **35**: p. 4444-4454.
31. Abu-Zahra, M.R.M., J.P.M. Niederer, and P.H.M. Feron, *CO2 capture from power plants; Part II. A parametric study of the*

economical performance based on mono-ethanolamine. International Journal of Greenhouse Gas Control I, 2007: p. 135-142.

32. Gibbins, J. and H. Chalmers, *Carbon capture and storage.* Energy Policy, 2008. **36**: p. 4317-4322.
33. EC, *Joint Research Center, Photovoltaic Geographical Information System.* 2009.
34. Law3299/2004, *Greek Ministry of Economy and Finance.*
35. EC, *Directive 2003/87/EC on the GHG Emissions.* 2003.
36. DOE, *U.S. Department of Energy, Carbon Capture Research.* 2007.
37. AUDESSY, *Water desalination software. Agricultural University of Athens*. 2007.
38. RAE, *Strategic options for the electrification of Greek islands and exploitation of available RES (in greek)*, in *IENE.* 2008: Syros, Greece.
39. Karagiannis, I. and F. Freire, *Life Cycle Assessment of water desalination systems in Milos and Thirasia islands*, in *1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS)*. 2009: Nisyros, Greece.
40. Kaldellis, J.K. and D. Zafirakis, *Present situation and future prospects of electricity generation in Aegean Archipelagos islands.* Energy Policy, 2007. **35**: p. 4623-4639.
41. WindCad, *Bergey Windpower Co. available online.* 2000.
42. Tsoutsos, T., et al., *Supporting schemes for renewable energy sources and their impact on reducing the emissions of greenhouse gases in Greece.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**: p. 1767-1788.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα της έλλειψης νερού είναι ιδιαίτερα μεγάλο στα ελληνικά νησιά και αναμένεται να ενταθεί στα επόμενα χρόνια. Στόχος της διδακτορικής αυτής διατριβής είναι η παροχή της απαραίτητης πληροφόρησης ώστε να χαραχτεί η σωστή στρατηγική επίλυσης του προβλήματος της έλλειψης νερού στον ελληνικό νησιωτικό χώρο, μέσω τόσο της οικονομικής όσο και της περιβαλλοντικής αξιολόγησης διαφορετικών συστημάτων αφαλάτωσης νερού με χρήση ή χωρίς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρουσιάζονται λοιπόν οι εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες αξιολογούνται τόσο περιβαλλοντικά όσο και από οικονομική άποψη. Από την έρευνα που έγινε, δεν βρέθηκε άλλη ανάλογη μελέτη που να έχει γίνει για τον ελληνικό νησιωτικό χώρο.

Σήμερα, οι κυριότεροι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος της έλλειψης νερού στα ελληνικά νησιά είναι αφενός η μεταφορά νερού με υδροφόρες και αφετέρου η σταδιακή εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Η μεταφορά του νερού πραγματοποιείται τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια και έχει αποτελέσει σημαντική λύση κυρίως κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, περίοδο που η ζήτηση για φρέσκο νερό πολλαπλασιάζεται. Μεγάλες ποσότητες νερού μεταφέρονται στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα κάθε χρόνο, με κόστος που φτάνει και τα 8€/m^3 και αυτό το κόστος αυξάνεται συνεχώς λόγω των ανατιμήσεων στα καύσιμα κ.ά. Καθίσταται λοιπόν σαφές πως η μεταφορά του νερού, λόγω του υψηλού κόστους δεν μπορεί να αποτελέσει μια μόνιμη λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού.
Αντιθέτως, η αφαλάτωση μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της υδροδότησης των νησιών των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων, καθώς μπορεί να προσφέρει σημαντικές ποσότητες νερού σε πολύ χαμηλότερο κόστος από αυτό της μεταφοράς με υδροφόρα πλοία. Το

κόστος της αφαλάτωσης δεν είναι το ίδιο σε κάθε νησί και εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα του διαθέσιμου για αφαλάτωση νερού, τις ειδικές συνθήκες και τον πληθυσμό του κάθε νησιού. Ένα τυπικό νησί των Κυκλάδων, η Μήλος, χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί το κόστος του αφαλατωμένου νερού σε ποσότητα ικανή να καλύψει τις ανάγκες του νησιού. Έπειτα από συνεκτίμηση όλων των στοιχείων κόστους για την εγκατάσταση και λειτουργία της απαιτούμενης μονάδας υπολογίστηκε ότι το κόστος αφαλάτωσης για το υφάλμυρο νερό είναι της τάξης των 0,79€/m^3. Αυτό το κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος μεταφοράς νερού, δείχνοντας πως το μέλλον της υδροδότησης των άνυδρων νησιών μπορεί να είναι η αφαλάτωση.

Αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, η αφαλάτωση αποτελεί πλέον την πιο σημαντική λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού. Το κόστος της έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης αλλά και της προσπάθειας για βελτιστοποίηση σε έναν κόσμο με συνεχώς μειούμενες ποσότητες και αυξανόμενες τιμές για τα ορυκτά καύσιμα. Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν συμβατικές μορφές ενέργειας με κόστος που μπορεί να κυμαίνεται από 0,40€/m^3 μέχρι και 3,00€/m^3 σε περιπτώσεις που το νερό τροφοδοσίας είναι θαλασσινό. Στην περίπτωση που το χρησιμοποιούμενο νερό είναι υφάλμυρο συνήθως το κόστος περιορίζεται στο μισό. Όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε το κόστος ανεβαίνει αισθητά φτάνοντας τα 15€/m^3 ή και ακόμα παρισσότερο. Παρόλα αυτά, το περιβαλλοντικό όφελος σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μεγάλο.
Επίσης, η χρησιμοποιούμενη μέθοδος αφαλάτωσης είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει το κόστος παραγωγής φρέσκου νερού. Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεσαίου και μεγάλου μεγέθους συστήματα ενώ οι μέθοδοι μεμβρανών είναι περισσότερο διαδεδομένες για μεσαίου και μικρού μεγέθους συστήματα αφαλάτωσης και οι μοναδικές που χρησιμοποιούνται για αφαλάτωση υφάλμυρων διαλυμάτων. Τα τελευταία

χρόνια οι μέθοδοι μεμβρανών και κυρίως η αντίστροφη ώσμωση εξαπλώνονται ταχύτατα και χρησιμοποιούνται ακόμα και σε πολυ μεγάλες μοναδες αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης α) η κατανάλωσή τους σε ενέργεια είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, μεσω της χρησιμοποίησης νέων συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, αλλά και β) το κόστος των μεμβρανών που αποτελούν σημαντικό ποσοστό του κόστους συνεχώς μειώνεται. Τέλος σε κάποιες ειδικές περιπώσεις έχει διαφανεί πως η χρήση υβριδικών συστημάτων τόσο για την παραγωγή της ενέργειας, όσο και για την καθεαυτού τεχνική της αφαλάτωσης μπορεί να δώσει ακόμα χαμηλότερο κόστος στο ανα κυβικό μέτρο παραγόμενο φρέσκο νερό.

Η μέθοδος της αφαλάτωσης νερού, δεν έχει μόνο χρηματοοικονομικό κόστος, καθώς λόγω των υψηλών της ενεργειακών απαιτήσεων καθίσταται σαφές πως υπάρχει και σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές μελέτες σχετικά με τον υπολογισμό της επίδρασης που έχει στο περιβάλλον η διαδικασία της αφαλάτωσης. Στις πιο σχετικές από αυτές, οι Raluy et al. εκτιμούν την επίδραση διαφορετικών μεθόδων αφαλάτωσης αλλά και διαφορετικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, με χρήση μεθόδων εκτίμησης κύκλου ζωής (LCA), υπολογίζοντας με τον τρόπο αυτό το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Σε καμμία μελέτη όμως δεν έχει πραγματοποιηθεί αποτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους της αφαλάτωσης σε συνδυασμό με διαφορετικά συστήματα παραγωγής ενέργειας με δεδομένα που να αφορούν την ελληνική πραγματικότητα, δίνοντας έτσι στοιχεία για την πραγματική περιβαλλοντική επίπτωση της αφαλάτωσης από μονάδες εγκατεστημένες στα ελληνικά νησιά.
Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης για τα ελληνικά νησιά χρειάστηκε να υπολογιστεί το περιβαλλοντικό κόστος της αφαλάτωσης για διαφορετικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Αυτό έγινε με τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπου «ισοδύναμου CO_2», αερίων που συντελούν σε μεγάλο βαθμό στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Σήμερα, τα ενεργειακά

συστήματα που χρησιμοποιούνται κυρίως από τις υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης είναι τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν ως κύρια καύσιμη ύλη το μαζούτ, με αποτέλεσμα να επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Από την αξιολόγηση διαφόρων συστημάτων αφαλάτωσης με χρήση τόσο ανεμογεννητριών όσο και φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναμένεται κατά πολύ χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.
Η χρήση των ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με την αφαλάτωση είναι η λιγότερο επιβαρυντική προς το περιβάλλον λύση στο πρόβλημα της έλλειψης νερού στα ελληνικά νησιά, καθώς μπορεί να επιτευχθεί μέχρι και 40 φορές μικρότερη εκπομπή αερίων θερμοκηπίου, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επίσης έγινε εμφανές πως ένα σύστημα αφαλάτωσης έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο μεγαλύτερο είναι το μεγεθός του. Ιδιαίτερα μεγάλο είναι το όφελος αυτό όταν συγκρίνονται μονάδες μεσαίου με μονάδες πολύ μικρού μεγέθους. Το αποτέλεσμα αυτό σχετίζεται κυρίως με το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι ένα σύστημα αφαλάτωσης, τόσο χαμηλότερες είναι οι ενεργειακές απαιτήσεις ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου φρέσκου νερού. Η λύση των φωτοβολταϊκών αποτελεί επίσης φιλική προς το περιβάλλον λύση, αν και είναι περισσότερο 'ρυπογόνος' σε σχέση με τη λύση των ανεμογεννητριών και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια αλλά χαμηλό αιολικό δυναμικό. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε αντιστοιχία με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, όπου όταν υπολογίζεται η περιβαλλοντική επίδραση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η λύση της ανεμογεννήτριας αποτελεί την καλύτερη επιλογή.

Για την χάραξη σωστής στρατηγικής όσον αφορά στη λύση του προβλήματος της έλλειψης νερού με τη χρησιμοποίηση τεχνολογιών αφαλάτωσης χρειάστηκε να συνεκτιμηθούν με κάποιον τρόπο τόσο το χρηματοοικονομικό κόστος όσο και η περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στη διατριβή αυτή περιγράφεται η πρωτότυπη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε

προκειμένου να εισάγουμε το CO_2 στην αναλυσή μας, προσθέτωντας το κόστος της μόλυνσης στο κόστος της διαδικασίας αφαλάτωσης. Με τον τρόπο αυτόν υπολογίστηκε η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 για την οποία καθίσταται συμφέρουσα η μετάβαση από τα συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν συμβατικές μορφές ενέργειας και χρησιμοποιούνται σήμερα (καύσης πετρελαίου) σε συστήματα αφαλάτωσης νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βρέθηκε πως για να αντικατασταθούν οι συμβατικές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φρέσκου νερού στα ελληνικά νησιά, παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις στην οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 για διαφορετικά κόστη παραγωγής συμβατικής ενέργειας και διαφορετική κατανάλωση της εκάστοτε μονάδας αφαλάτωσης. Η αιολική ενέργεια, λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού και των χαμηλότερων περιβαλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη όταν εγκαθίσταται ένα νέο σύστημα αφαλάτωσης. Αυτό, όχι μόνο λόγω της πιο μικρής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, αλλά και λόγω του γεγονότος ότι το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση ανεμογεννητριών είναι μικρότερο από το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα σε μικρά και μεσαίου μεγέθους νησιά.

Σήμερα, υπάρχει ένας σχετικά μικρός αριθμός μονάδων αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά. Οι περισσότερες από αυτές λειτουργούν με ηλεκτρισμό από το δίκτυο αν και το ρεύμα που προέρχεται από ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι φθηνότερο. Αυτό συμβαίνει διότι η χρήση ηλεκτρικού από το δίκτυο είναι η 'βολική' λύση, επειδή δεν διακόπτεται όταν δεν υπάρχει ικανοποιητική ταχύτητα ανέμου, δεν απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις και υπάρχει πάντα η δυνατότητα να προστεθεί αργότερα μια ανεμογεννήτρια. Επιπλέον, αν και το πραγματικό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού στα ελληνικά νησιά είναι σχετικά ψηλό, αυτό δεν αντικατοπτρίζεται στο λογαριασμό που πληρώνουν οι ιδιώτες, καθώς η ΔΕΗ χρηματοδοτεί το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος στα νησιά, οπότε σε αρκετές περιπτώσεις η

ενέργεια που παράγεται απο ανεμογεννήτριες είναι οικονομικά λιγότερο ελκυστική.

Ακόμα όμως και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά συστήματα, η οριακή τιμή των εκπομπών CO_2 είναι πολύ κοντά σε αυτές που υπολογίζονται για την παγίδευση και αποθήκευση των ρύπων και σε πολλές περιπτώσεις μικρότερη από τις χρηματοοικονομικές ποινές που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Καθίσταται επίσης σαφές πως για υψηλές πραγματικές τιμές κόστους παραγωγής ενέργειας (πάνω από 0,29 €/kWh) όπως είναι γεγονός σε πολλά μικρά ελληνικά νησιά, η επιλογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή φρέσκου νερού καθίσταται μονόδρομος ακόμα και χωρίς να ληφθεί υπόψην το περιβαλλοντικό τους πλεονέκτημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 14040, I., *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO).* 2006.
2. Abdallah, S., M. Abu-Hilal, and M.S. Mohsen, *Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions.* Desalination, 2005. **183**: p. 95-104.
3. Aboabboud, M. and S. Elmasallati, *Potable water production from seawater by the reverse osmosis.* Desalination, 2007. **203**: p. 119-133.
4. Abu-Zahra, M.R.M., J.P.M. Niederer, and P.H.M. Feron, *CO2 capture from power plants; Part II. A parametric study of the economical performance based on mono-ethanolamine.* International Journal of Greenhouse Gas Control I, 2007: p. 135-142.
5. Ackermann, T. and L. Soder, *An overview of wind energy - status 2002.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2002. **6**: p. 67-128.
6. Afonso, M.D., J.O. Jaber, and M.S. Mohsen, *Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan.* Desalination, 2004. **164**: p. 157-171.
7. Agashichev, S.P., *Analysis of integrated co-generative schemes inclding MSF, RO and power generating systems (present value of expenses and "levelised" cost of water).* Desalination, 2004. **164**: p. 281-302.
8. Agashichev, S.P. and M.E. El-Dahshan, *Reverse osmosis incorporated into existing cogenerating systems as a sustainable technological alternative for United Arab Emirates.* desalination, 2003. **157**: p. 33-49.

9. Agashichev, S.P. and A.M. El-Nashar, *Systemic approach for techno-economic evaluation of triple hybrid (RO, MSF and power generation) scheme including accounting of CO2 emission.* Energy, 2005. **30**: p. 1283-1303.
10. Akella, A.K., M.P. Sharma, and R.P. Saini, *Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2005: p. 1-15.
11. Al-Agha, M.R. and R.S. Mortaja, *Desalination in the Gaza Strip: drinking water supply and environmental impact.* Desalination, 2005. **173**: p. 157-171.
12. Alameddine, I. and M. El-Fadel, *Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design.* Desalination, 2007. **214**: p. 241-260.
13. Al-bahou, M., et al., *Desalination experience in Kuwait.* Desalination, 2007. **204**: p. 403-415.
14. Al-Bahri, Z.K., W.T. Hanbury, and T. Hodgkiess, *Optimum feed temperatures for seawater reverse osmosis plant operation in an MSF/SWRO hybrid plant.* Desalination, 2001. **138**: p. 335-339.
15. Al-Juaied, M. and A. Whitmore, *'Realistic Costs of Carbon Capture' Discussion Paper 2009-08.* Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, 2009.
16. Alklaibi, A.M. and N. Lior, *Membrane-distillation desalination: status and potential.* Desalination, 2004. **171**: p. 111-131.
17. Almulla, A., A. Hamad, and M. Gadalla, *Integrating hybrid systems with existing thermal desalination plants.* Desalination, 2005. **174**: p. 171-192.
18. Al-Sahlawi, M.A., *Seawater desalination in Saudi Arabia: economic review and demand projections.* Desalination, 1999. **123**: p. 143-147.

19. Al-Wazzan, Y., et al., *Desalting of subsurface water using spiral-wound reverse osmosis (RO) system: technical and economic assessment.* Desalination, 2002. **143**: p. 21-28.
20. AMTA, *(American Membrane Technology Association) Desalting Facts: How Much Does Desalted Water Cost?* . 2005.
21. Andrianne, J. and F. Alardin, *Thermal and membrane process economics: optimized selection for seawater desalination.* Desalination, 2002. **153**: p. 305-311.
22. Antrim, B., et al., *Worlds largest spiral element - history and development.* Desalination, 2005. **178**: p. 313-324.
23. Ardente, F., et al., *Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**: p. 200-217.
24. Areiqat, A. and K.A. Mohamed, *Optimization of the negative impact of power and desalination plants on the ecosystem.* Desalination, 2005. **185**: p. 95-103.
25. Arnal, J.M., et al., *Concentration of brines from RO desalination plants by natural evaporation.* Desalination, 2005. **182**: p. 435-439.
26. Assimacopoulos, A., *Innovation and Sustainable Management of Water Resources: the New Paradigms in Small Islands*. 2002.
27. Atikol, U. and H.S. Aybar, *Estimation of water production cost in the feasibility analysis of RO systems.* Desalination, 2005. **184**: p. 253-258.
28. AUDESSY, *Water desalination software. Agricultural University of Athens*. 2007.
29. Avlonitis, S.A., *Operational water cost and productivity improvements for small-size RO desalination plants.* Desalination, 2002. **142**: p. 295-304.

30. Avlonitis, S.A., K. Kouroumbas, and N. Vlachakis, *Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants.* Desalination, 2003. **157**: p. 151-158.
31. Avlonitis, S.A., et al., *Water resources management for the perfecture of Dodekanisa of Greece.* Desalination, 2002. **152**: p. 41-50.
32. Banat, F., V. Subiela, and H. Qiblawey, *Site selection for the installation of autonomous desalination systems (ADS).* Desalination, 2007. **203**: p. 410-416.
33. Belessiotis, V. and E. Delyannis, *The history of renewable energies for water desalination.* Desalination, 2000. **128**: p. 147-159.
34. Belessiotis, V. and E. Delyannis, *Water shortage and renewable energies (RE) desalination - possible technological applications.* Desalination, 2001. **139**: p. 133-138.
35. Bernal-Agustin, J.L. and R. Dufo-Lopez, *Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain.* Renewable energy, 2006. **31**: p. 1107-1128.
36. Bick, A. and G. Oron, *Post-treatment design of seawater reverse osmosis plants: Boron removal technology selection for potable water production and environmental control.* Desalination, 2005. **178**: p. 233-246.
37. Blank, J.E., G.F. Tusel, and S. Nisan, *The real cost of desalted water and how to reduce it further.* Desalination, 2007. **205**: p. 298-311.
38. Borsani, R. and S. Rebagliati, *Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies.* Desalination, 2005. **182**(1-3): p. 29-37.
39. Bourouni, K., M.T. Chaibi, and L. Tadrist, *Water desalinaton by humidification and dehumidification of air: state of the art.* Desalination, 2001. **137**: p. 167-176.

40. Bouzguenza, N., S. Nisan, and M. Albouy, *Financing of an integrated nuclear desalination system in developing countries.* Desalination, 2007. **205**: p. 317-331.
41. Brehant, A., V. Bonnelye, and M. Perez, *Comparison of MF/UF pretreatmentwith conventional filtration prior to RO membranes for surface seawater desalination.* Desalination, 2002. **144**: p. 353-360.
42. Bruggen, B. and C. Vandecasteele, *Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination.* Desalination, 2002. **143**: p. 207-218.
43. Buros, O.K., *The ABCs of Desalting.* 2000.
44. Canals, L.M.i., et al., *Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways.* Int. J. Life Cycle Assess., 2009. **14**: p. 28-42.
45. Cardona, E. and A. Piacentino, *Performance evaluation of CHP hybrid seawater desalination plants.* Desalination, 2007. **205**: p. 1-14.
46. Cardona, E., A. Piacentino, and F. Marchese, *Energy saving in two-stage reverse osmosis systems coupled with ultrafiltration processes.* Desalination, 2005. **184**: p. 125-137.
47. Chafik, E., *A new seawater desalination process using solar energy.* Desalination, 2002. **153**: p. 25-37.
48. Chafik, E., *A new type of seawater desalination plants using solar energy.* Desalination, 2003. **156**: p. 333-348.
49. Chafik, E., *Design of plants for solar desalination using the multi-stage heating/humidifying technique.* Desalination, 2004. **168**: p. 55-71.
50. Commission, E., *Directive 2003/87/EC on the GHG Emissions Trading.* 2003.

51. Cormio, C., et al., *A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2003. **7**: p. 99-130.
52. Cote, P., S. Siverns, and S. Monti, *Comparison of Membrane-based Solutions for Water Reclamation and Desalination.* Desalination, 2005. **182**: p. 251-257.
53. Darwish, M.A., N.M. Al-Najem, and N. Lior, *Towards sustainable seawater desalting in the Gulf area.* Desalination, 2009. **235**: p. 58-87.
54. Darwish, M.A., F.A. Asfour, and N. Al-Najem, *Energy consumption in equivalent work by different desalting methods: case study for Kuwait.* Desalination, 2002. **152**: p. 83-92.
55. Delyannis, E., *Historic background of desalination and renewable energies.* Solar energy, 2003. **75**: p. 357-366.
56. Delyannis, E.-E. and V. Belessiotis, *Solar application in desalination: the Greek Islands experiment.* Desalination, 1995. **100**: p. 27-34.
57. Delyianni, E. and B. Belessiotis, *Methods and Desalination Systems - Principles of the desalination process.* 1995, Athens, Greece: NCSR "Demokritos".
58. Denny, E. and M. O'Malley, *The impact of carbon prices on generation-cycling costs.* Energy Policy, 2009. **37**: p. 1204-1212.
59. Dharmappa, H.B. and P. Hagare, *Economic analysis and design of crossflow microfiltration for water treatment systems.* Desalination, 1999. **121**: p. 1-11.
60. DOE, *U.S. Department of Energy, Carbon Capture Research.* 2007.
61. Dore, M.H.I., *Forecasting the economic costs of desalination technology.* Desalination, 2005. **172**: p. 207-214.

62. Dreizin, Y., *Ashkelon seawater desalination project - off-taker's self costs, supplied water costs, total costs and benefits.* Desalination, 2006. **190**: p. 104-116.
63. Drioli, E., A. Criscuoli, and E. Curcio, *Integrated membrane operations for seawater desalination.* Desalination, 2002. **147**: p. 77-81.
64. EC, *Directive 2003/87/EC on the GHG Emissions.* 2003.
65. EC, *Joint Research Center, Photovoltaic Geographical Information System.* 2009.
66. Einav, R., K. Harussi, and D. Perry, *The footprint of the desalination processes on the environment.* Desalination, 2002. **152**: p. 141-154.
67. Elabbar, M.M. and F.A. Elmabrouk, *Environmental impact assessment for desalination plants in Libya. Case study: Benghazi North and Tobrouk desalination plants.* Desalination, 2005. **185**: p. 31-44.
68. Elguera, A.M. and S.O.P. Baez, *Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake.* Desalination, 2005. **184**: p. 173-183.
69. El-Nashar, A.M., *Effect of dust deposition on the performance of a solar desalination plant operating in an arid desert area.* Solar energy, 2003. **75**: p. 421-431.
70. Ettouney, H., *Visual basic computer package for thermal and membrane desalination processes.* Desalination, 2004. **165**: p. 393-408.
71. EU, *Πολιτικές τιμολόγησης για την ενίσχυση της αειφορίας των υδάτινων πόρων.* 2000.
72. FAO, *Water & poverty, an issue of life & livelihoods.* (available online), 2010.

73. Fath, H.E.S., *Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment.* Desalination, 1998. **116**: p. 45-56.
74. Fath, H.E.S., et al., *A stand alone complex for the production of water, food, electrical power and salts for the sustainable development of small communities in remote areas.* Desalination, 2005. **183**: p. 13-22.
75. Fiorenza, G., V.K. Sharma, and G. Braccio, *Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant.* Energy Conversion & Management, 2003. **44**: p. 2217-2240.
76. Franco, A. and A.R. Diaz, *The future of challenges for 'clean coal technologies': Joining efficiency increase and pollutant emission control.* Energy, 2009. **34**: p. 348-354.
77. Fritzmann, C., et al., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination.* Desalination, 2007. **216**: p. 1-76.
78. Fthenakis, V.M., H.C. Kim, and E. Alsema, *Emissions from Photovoltaic Life Cycles.* Environmental Science & Technology, 2008. **42**: p. 2168-2174.
79. Gaid, K. and Y. Treal, *Le dessalement des eaux par osmose inverse: l'expérience de Véolia Water.* Desalination, 2007. **203**: p. 1-14.
80. Garcia-Castello, E., et al., *Designing a desalination plant for a tourist city located in the Mediterranean Spanish coast.* Desalination, 2007. **203**: p. 189-198.
81. Garcia-Rodriguez, L., *Seawater desalination driven by renewable energies: a review.* Desalination, 2002. **143**: p. 103-113.
82. Gibbins, J. and H. Chalmers, *Carbon capture and storage.* Energy Policy, 2008. **36**: p. 4317-4322.
83. Gilau, A.M. and M.J. Small, *Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options.* Renewable energy, 2008. **33**: p. 617-630.

84. Glueckstern, P., M. Priel, and E. Kotzer, *Blending brackish water with desalted seawater as an alternative to brackish water desalination.* Desalination, 2005. **178**: p. 227-232.
85. Goosen, M.F.A., et al., *Solar energy desalination for arid coastal regions: development of humidification-dehumidification seawater greenhouse.* Solar energy, 2003. **75**: p. 413-419.
86. Habib, K., O. Almatar, and B. Alfeeli, *Risk assessment and evaluation of materials commonly used in desalination plants subjected to stress corrosion cracking in polluted marine environment.* Desalination, 2002. **153**: p. 217-221.
87. Hafez, A. and S. El-Manharawy, *Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study.* Desalination, 2002. **153**: p. 335-347.
88. Hajeeh, M. and A. Al-Otman, *Application of the analytical hierarchy process in the selection of desalination plants.* Desalination, 2005. **174**: p. 97-108.
89. Hamieh, B.M. and J.R. Beckman, *Seawater desalination using Dewvaporation technique: experimental and enhancement work with economic analysis.* Desalination, 2006. **195**: p. 14-25.
90. Hashim, A. and M. Hajjaj, *Impact of desalination plants fluid effluents on the integrity of seawater, with the Arabian Gulf in perspective.* Desalination, 2005. **182**: p. 373-393.
91. Hasson, D. and O. Bendrihem, *Modeling remineralization of desalinated water by limestone dissolution.* Desalination, 2006. **190**: p. 189-200.
92. Heidari, A.A. and K. Shiati, *Using the novel technology of desalinated seawater by solar cell & lithium bromide absorption chiller in rural area.* Desalination, 2005. **183**: p. 23-27.

93. Helal, A.M., et al., *Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants Part I: Modeling and algorithms.* Desalination, 2003. **154**: p. 43-66.
94. Herbert, G.M.J., et al., *A review of wind energy technologies.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2006.
95. Hernandez, F., et al., *Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach.* Desalination, 2006. **187**: p. 253-261.
96. Herold, D. and A. Neskakis, *A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria.* Desalination, 2001. **137**: p. 285-292.
97. Hoepner, T., *A procedure for environmental impact assessments (EIA) for seawater desalination plants.* Desalination, 1999. **12**: p. 1-12.
98. Hondo, H., *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case.* Energy, 2005. **30**: p. 2042-2056.
99. IDA, *Desalination in 2008 - Global Market Snapshot.*
100. IEA, *CO2 capture & Storage.* IEA Energy Technology Essentials, 2006.
101. Institute, T.W., *State of the World.* 2008. p. 108.
102. IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage.* Cambridge University Press, 2005: p. p.347.
103. Jaber, I.S. and M.R. Ahmed, *Technical and economic evaluation of brackish groundwater desalination by reverse osmosis (RO) process.* Desalination, 2004. **165**: p. 209-213.
104. Jungbluth, N., *Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss ecoinvent Database.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005. **13**: p. 429-446.
105. Jungbluth, N., et al., *Life Cycle Asessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power.* Int. J. Life Cycle Assess., 2005. **10**: p. 24-34.

106. Kagarakis, K., *Photovoltaic Technology (in greek).* 1992.
107. Kahraman, N., et al., *Exergy analysis of a combined RO, NF, and EDR desalination plant.* Desalination, 2004. **171**: p. 217-232.
108. Kaldellis, J.K., *Social attitude towards wind energy applications in Greece.* Energy Policy, 2005. **33**: p. 595-602.
109. Kaldellis, J.K. and K.A. Kavadias, *Laboratory Applications of Soft Energy Sources (in greek).* 2001.
110. Kaldellis, J.K., K.A. Kavadias, and E. Kondili, *Renewable energy desalination plants for the Greek islands - technical and economic considerations.* Desalination, 2004. **170**: p. 187-203.
111. Kaldellis, J.K., K.A. Kavadias, and P.S. Koronakis, *Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2005: p. 1-21.
112. Kaldellis, J.K., K.A. Kavadias, and P.S. Koronakis, *Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**: p. 57-77.
113. Kaldellis, J.K., K.A. Kavadias, and G. Spyropoulos, *Investigating the real situation of Greek solar water heating market.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2005. **9**: p. 499-520.
114. Kaldellis, J.K. and E.M. Kondili, *The water shortage probem in the Aegean archipelago islands: cost-effective desalination prospects.* Desalination, 2007. **216**: p. 123-138.
115. Kaldellis, J.K. and G.T. Vlachos, *Optimum sizing of an autonomous wind - diesel hybrid system for various representative wind - potential cases.* applied energy, 2006. **83**: p. 113-132.
116. Kaldellis, J.K., D.S. Vlachou, and G. Korbakis, *Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis.* energy Policy, 2005. **33**: p. 1969-1985.

117. Kaldellis, J.K. and D. Zafirakis, *Present situation and future prospects of electricity generation in Aegean Archipelagos islands.* Energy Policy, 2007. **35**: p. 4623-4639.
118. Kallis, G. and D. Butler, *The EU water framework directive: measures and implications.* Water Policy, 2001. **3**(2): p. 125-142.
119. Kalogirou, S., *Survey of solar desalination systems and system selection.* Energy, 1996. **22**(1): p. 69-81.
120. Kalogirou, S., *Economic analysis of a solar assisted desalination system.* Renewable energy, 1997. **12**(4): p. 351-367.
121. Kalogirou, S.A., *Effect of fuel cost on the price of desalination water: a case for renewables.* Desalination, 2001. **138**: p. 137-144.
122. Kalogirou, S.A., *Seawater desalination using renewable energy sources.* Progress in Energy and Combustion Science, 2005. **31**(3): p. 242-281.
123. Karagiannis, I. and F. Freire, *Life Cycle Assessment of water desalination systems in Milos and Thirasia islands*, in *1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS)*. 2009: Nisyros, Greece.
124. Karagiannis, I. and P. Soldatos, *Water desalination cost literature: Review and assessment.* Desalination, 2008. **223**: p. 458-466.
125. Karagiannis, I.C. and P.G. Soldatos, *Current status of water desalination in the Aegean Islands.* Desalination, 2007. **203**: p. 56-61.
126. Karavitis, C.A., *Drought and urban water supplies: the case of metropolitan Athens.* Water Policy, 1998. **1**: p. 505-524.
127. Karavitis, C.A. and P. Kerkides, *Estimation of the Water Resources Potential in the Island System of the Aegean Archipelago, Greece.* International Water Resources Association, 2002. **27**(2).
128. Kelkar, P.S., et al., *Performance evaluation of reverse osmosis desalination plants for rural water supply in a developing country -*

A case study. Environmental Monitoring and Assessment, 2003. **89**: p. 243-261.

129. Kershman, S.A., J. Rheinlander, and H. Gabler, *Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya.* Desalination, 2002. **153**: p. 17-23.
130. Kershman, S.A., et al., *Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya - Gecol's facility for medium and small scale research at Ras Ejder.* Desalination, 2005. **183**: p. 1-12.
131. Khawaji, A.D., I.K. Kutubkhanah, and J.-M. Wie, *A 13.3 MGD seawater RO desalination plant for Yanbu Industrial City.* Desalination, 2007. **203**: p. 176-188.
132. Kiranoudis, C.T., N.G. Voros, and Z.B. Maroulis, *Wind energy exploitation for reverse osmosis desalination plants.* Desalination, 1997. **109**: p. 195-209.
133. Kong, C., J. Bang, and Y. Sugiyama, *Structural investigation of composite wind turbine bladeconsidering various load cases and fatigue life.* Energy, 2005. **30**: p. 2101-2114.
134. Koning, J. and S. Thiesen, *Aqua Solaris- an optimized small scale desalination system with 40 litres output per square meter based upon solar-thermal distillation.* Desalination, 2005. **182**: p. 503-509.
135. Koroneos, C., N. Stylos, and N. Moussiopoulos, *LCA of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Systems. Part 2: Application on an Island Economy.* Int. J. Life Cycle Assess., 2006. **11**(3): p. 183-188.
136. Koroneos, C., et al., *Optimization of energy production system in the Dodecanese Islands.* Renewable energy, 2005. **30**: p. 195-210.

137. Kosmadakis, G., et al., *Economic assessment of a two-stage solar organic Rankine cycle for reverse osmosis desalination.* Renewable energy, 2009. **34**: p. 1579-1586.
138. Kotzer, E., *Artificial kidneys for the soil - solving the problem of salinization of the soil and underground water.* Desalination, 2005. **185**: p. 71-77.
139. Koutsakos, E., K. Savvides, and K. Savva, *Larnaca desalination plant operation - a client and contractor perspective.* Desalination, 2005. **184**: p. 157-164.
140. Kronenberg, G., *The largest SWRO plant in the world — Ashkelon 100 million m3/y BOT project.* Desalination, 2004: p. 457-463.
141. Lamnatou, C., S. Rozakis, and G. Papadakis, *Mathematical Simulation and Economic Analysis of a Simple Solar Still Desalination System.* 2005.
142. Latorre, M., *Environmental impact of brine disposal on Posidonia seagrasses.* Desalination, 2005. **182**: p. 517-524.
143. Lattemann, S. and T. Hopner, *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.* Desalination, 2008. **220**: p. 1-15.
144. Law3299/2004, *Greek Ministry of Economy and Finance.*
145. Leitner, G.F., *Costs of seawater desalination in real terms, 1979 through 1989, and projections for 1999.* Desalination, 1989. **76**: p. 201-213.
146. Leitner, G.F., *Total water costs on a standard basis for three large, operating, SWRO plants.* Desalination, 1991. **81**: p. 39-48.
147. Leitner, G.F., *Whatever happened to seawater desalting in the US? (Can the trend be changed?).* Desalination, 1995. **102**: p. 199-207.
148. Leitner, G.F. and W. Leitner, *Life cycle and present worth cost concepts, applicable for large desalting plants.* Desalination, 1994. **97**: p. 291-300.

149. Leitner, W., *Potable water desalination in the U.S. Capital costs, operating costs and water selling prices.* Desalination, 1992. **88**: p. 279-285.
150. Lenzen, M. and J. Munksgaard, *Energy and CO_2 life-cycle analyses of wind turbines - review and applications.* Renewable energy, 2002. **26**: p. 339-362.
151. Lenzen, M. and U. Wachsmann, *Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment.* applied energy, 2004. **77**: p. 119-130.
152. Ljubas, D., *Solar photocatalysis - a possible step in drinking water treatment.* Energy, 2005. **30**: p. 1699-1610.
153. Lokiec, F. and G. Kroneberg, *Emerging role of BOOT desalination projects.* Desalination, 2001. **136**: p. 109-114.
154. Mabrouk, A.A., A.S. Nafey, and H.E.S. Fath, *Thermoeconomic analysis of some existing desalination processes.* Desalination, 2007. **205**: p. 354-373.
155. Mahi, P., *Developing environmentally acceptable desalination processes.* Desalination, 2001. **138**: p. 167-172.
156. Malek, A., M.N.A. Hawlader, and J.C. Ho, *Design and economics of RO seawater desalination.* Desalination, 1996. **105**: p. 245-261.
157. Malek, S.A.A. and A.M.O. Mohamed, *Environmental impact assessment of off shore oil spill on desalination plant.* Desalination, 2005. **185**: p. 9-30.
158. Malfeito, J.J., et al., *Brine discharge from the Javea desalination plant.* Desalination, 2005. **185**: p. 87-94.
159. Manolakos, D., *Doctoral Thesis.* 2008.
160. Manolakos, D., et al., *Cost Analysis and Economic Evaluation of an Autonomous Low-Temperature Solar Rankine Cycle System for Reverse Osmosis Desalination - Comparison with a Simple Solar Still*

Desalination System. WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT, 2005. **1**(2).

161. Manolakos, D., et al. *Cost Analysis of an Autonomous Low-Temperature Solar Rankine Cycle System for Reverse Osmosis Desalination.* in *4th WSEAS International Conference, Ecosystems and Development.* 2005. Venice, Italy, 2-4 November 2005.
162. Manolakos, D., et al., *Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island.* Desalination, 2008. **221**: p. 37-46.
163. Manolakos, D., et al., *Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination.* Desalination, 2005. **183**: p. 73-80.
164. Manolakos, D., et al., *A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas Case study: the Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece.* Energy, 2001. **26**: p. 679-704.
165. Manoli, E., D. Assimacopoulos, and C.A. Karavitis, *Water supply management approaches using RES on the island of Rhodes, Greece.* Desalination, 2004. **161**: p. 179-189.
166. Manologlou, E., P. Tsartas, and A. Markou, *Geothermal energy sources for water production - socio-economic effects and people's wishes on Milos island: a case study.* Energy Policy, 2004. **32**: p. 623-633.
167. Marcovecchio, M.G., P.A. Aguirre, and N.J. Scenna, *Globala optimal design of reverse osmosis networksfor seawater desalination: modeling and algorithm.* Desalination, 2005. **184**: p. 259-271.

168. Marcovecchio, M.G., et al., *Optimization of hybrid desalination processes including multi stage flash and reverse osmosis systems.* Desalination, 2005. **182**: p. 111-122.
169. Mariolakos, I., *Water resources management in the framework of sustainable development.* Desalination, 2007. **213**: p. 147-151.
170. Mariolakos, I., et al., *Water, mythology and environmental education.* Desalination, 2007. **213**: p. 141-146.
171. Martinez, E., et al., *Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method.* Int. J. Life Cycle Assess., 2009. **14**: p. 52-63.
172. Mathioulakis, E. and V. Belessiotis, *Integration of solar still in amulti-source, multi-use environment.* Solar energy, 2003. **75**: p. 403-411.
173. Mathioulakis, E., V. Belessiotis, and E. Delyannis, *Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art.* Desalination, 2007. **203**: p. 346-365.
174. Mauguin, G. and P. Corsin, *Concentrate and other waste disposals from SWRO plants: characterization and reduction of their environmental impact.* Desalination, 2005. **182**: p. 355-364.
175. McKinsey&Company, *Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics.* 2008.
176. Medeazza, G.L.M.v., *"Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination.* Desalination, 2005. **185**: p. 57-70.
177. MEDRC, *Matching renewable energy with small unit desalination plants: Development of a pc-based decision support system.* 2002.
178. Mentzelopoulos, P. and A. Drosinou. *Wind desalination market potential in the aegean sea greek islands.* 1996. Santorini.
179. Methnani, M., *Influence of fuel costs on seawater desalination options.* Desalination, 2007. **205**: p. 332-339.

180. Migliorini, G., C. Cattani, and E. Luzzo, *How many ppm? The unresolved problem of acid dosing in the reverse osmosis plant design.* Desalination, 2005. **184**: p. 165-171.
181. Mihalakou, G., et al., *Application of renewable energy sources in the Greek islands of the South Aegean Sea.* Renewable energy, 2002. **26**: p. 1-19.
182. Miranda, M.S. and D. Infield, *A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries.* Desalination, 2002. **153**: p. 9-16.
183. Mohamed, E.S. and G. Papadakis, *Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics.* Desalination, 2004. **164**: p. 87-97.
184. Mohamed, E.S., et al., *The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation.* Desalination, 2005. **184**: p. 241-246.
185. Mohamed, E.S., et al., *An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with an hydraulic energy recovery unit.* Desalination, 2006. **194**: p. 239-250.
186. Mohamed, K.A., M. Odeh, and A. Areiqat, *Environmental impact assessment on a plant located inside a lagoon.* Desalination, 2005. **185**: p. 45-56.
187. Mooij, C., *Hamma Water Desalination Plant: planning and funding.* Desalination, 2007. **203**: p. 107-118.
188. Munoz, I. and A.R. Fernandez-Alba, *Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources.* Water Research, 2008. **42**: p. 801-811.

189. Nakata, T., K. Kubo, and A. Lamont, *Design for renewable energy systems with application to rural areas in Japan.* Energy Policy, 2005. **33**(2): p. 209-219.
190. Nisan, S. and S. Dardour, *Economic evaluation of nuclear desalination systems.* Desalination, 2007. **205**: p. 231-242.
191. Ophir, A. and F. Lokiec, *Advanced MED process for most economical sea water desalination.* desalination, 2005. **182**: p. 187-198.
192. Ortiz, M., et al., *Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town.* Desalination, 2007. **204**: p. 121-131.
193. Pais, J.A.G.C.R. and L.M.G.A. Ferreira, *Performance study of an industrial RO plant for seawater desalination.* Desalination, 2007. **208**: p. 269-276.
194. Papapetrou, M., et al., *Market analysis for Autonomous Desalination Systems powered by renewable energy in southern Mediterranean countrie. Case study on Turkey.* Desalination, 2005. **183**: p. 29-40.
195. Parekh, S., et al., *Solar desalination with a humidification-dehumidification technique - a comprehensive technical review.* Desalination, 2004. **160**: p. 167-186.
196. Paulsen, K. and F. Hensel, *Introduction of a new Energy Recovery System - optimized for the combination with renewable energy.* Desalination, 2005. **184**: p. 211-215.
197. Pehnt, M., *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.* Renewable energy, 2006. **31**: p. 55-71.
198. Poullikas, A., *Optimization algorithm for reverse osmosis desalination economics.* Desalination, 2001. **133**: p. 75-81.

199. Poullikkas, A., *Technical and economic analysis for the integration of small reverse osmosis desalination plants into MAST gas turbine cycles for power generation.* Desalination, 2005. **172**: p. 145-150.
200. Pucar, M. and A. Despic, *The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors.* Renewable energy, 2005. **30**: p. 1749-1758.
201. Purnama, A., H.H. Al-Barwani, and R. Smith, *Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas.* Desalination, 2005. **185**: p. 79-86.
202. RAE, *Strategic options for the electrification of Greek islands and exploitation of available RES (in greek)*, in *IENE.* 2008: Syros, Greece.
203. Raghuvanshi, S.P., A. Chandra, and A.K. Raghav, *Carbon dioxide emissions from coal based power generation in India.* Energy Conversion & Management, 2006. **47**: p. 427-441.
204. Raluy, G., L. Serra, and J. Uche, *Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies.* Energy, 2006. **31**: p. 2361-2372.
205. Raluy, R.G., L. Serra, and J. Uche, *Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies.* Desalination, 2005. **183**: p. 81-93.
206. Raluy, R.G., L. Serra, and J. Uche, *Life Cycle Assessment of Water Production Technologies - Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO).* Int. J. Life Cycle Assess., 2005. **10**(4): p. 285-293.
207. Raluy, R.G., et al., *Life-cycle assessment of desalination technologies integrated with energy production systems.* Desalination, 2004. **167**: p. 445-458.
208. Raluy, R.G., et al., *Life Cycle Assessment of Water Production Technologies - Part 2: Reverse Osmosis Desalination versus the Ebro*

River Water Transfer. Int. J. Life Cycle Assess., 2005. **10**(5): p. 346-354.

209. Ravizky, A. and N. Nadav, *Salt production by the evaporation of SWRO brine in Eilat: a success story.* Desalination, 2007. **205**: p. 374-379.
210. Rayan, M.A. and I. Khaled, *Seawater desalination by reverse osmosis (case study).* Desalination, 2002. **153**: p. 245-251.
211. Rebitzer, G., et al., *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications.* ENVIRONMENT INTERNATIONAL, 2004. **30**: p. 701-720.
212. Reddy, K.V. and N. Ghaffour, *Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies.* Desalination, 2007. **205**: p. 340-353.
213. Redondo, J.A., *Brackish-, sea-, and wastewater desalination.* 2001. **138**: p. 29-40.
214. Rheinlander, J., E.W. Perz, and O. Goebel, *Performance simulation of integrated water and power systems - software tools IPSEpro and RESYSpro for technical, economic and ecological analysis.* Desalination, 2003. **157**: p. 57-64.
215. Rico, D.P. and M.F.C. Arias, *A reverse osmosis potable water plant at Alicante University: first years of operation.* Desalination, 2001. **137**: p. 91-102.
216. Ringel, M., *Fostering the use of renewable energies in the European Union: the race between feed-in tariffs and green certificates.* Renewable energy, 2006. **31**: p. 1-17.
217. Rodriguez, L.G., *Renewable energy applications in desalination: state of the art.* Solar energy, 2003. **75**: p. 381-393.
218. Rodriguez, L.G., V.R. Ternero, and C.G. Camacho, *Economic analysis of wind-powered desalination.* Desalination, 2001. **137**: p. 259-265.

219. Rozakis, S., et al., *Evaluation of an integrated renewable energy system for electricity generation in rural areas.* Energy Policy, 1997. **25**(3): p. 337-347.
220. Rubin, E.S., C. Chen, and A.B. Rao, *Cost and performance of fossil fuel power plants with CO2 capture and storage.* Energy Policy, 2007. **35**: p. 4444-4454.
221. Sadhwani, J.J., J.M. Veza, and C. Santana, *Case studies on environmental impact of seawater desalination.* Desalination, 2005. **185**: p. 1-8.
222. Sambrailo, D., J. Ivic, and A. Krstulovic, *Economic evaluation of the first desalination plant in Croatia.* Desalination, 2005. **170**: p. 339-344.
223. Sanz, M.A., V. Bonnelye, and G. Cremer, *Fujairah reverse osmosis plant: 2 years of operation.* Desalination, 2007. **203**: p. 91-99.
224. Sauvet-Goichon, B., *Ashkelon desalination plant - A successful challenge.* Desalination, 2007. **203**: p. 75-81.
225. Schleisner, L., *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities.* Renewable energy, 2000. **20**: p. 279-288.
226. Scrivani, A., *Energy management and DSM techniques for a PV-diesel powered seawater reverse osmosis desalination plant in Ginostra, Sicily.* Desalination, 2005. **183**: p. 63-72.
227. Seibert, U. and G. Vogt, *ADIRA.* Desalination, 2004. **168**: p. 29-37.
228. Singh, D., et al., *Techno-economic study of CO2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O2/CO2 recycle combustion.* Energy Conversion & Management, 2003. **44**: p. 3073-3091.
229. Sommariva, C., H. Hogg, and K. Callister, *Maximum economic design life for desalination plant: the role of auxiliary equipment materials selection and specification in plant reliability.* Desalination, 2002. **153**: p. 199-205.

230. Souari, L. and M. Hassairi, *Sea water desalination by reverse osmosis: the true needs for energy.* Desalination, 2007. **26**: p. 465-473.
231. Stokes, J. and A. Horvath, *Life Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems.* Int. J. Life Cycle Assess., 2006. **11**: p. 335-343.
232. Stoppato, A., *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation.* Energy, 2008. **33**: p. 224-232.
233. Stover, R.L., A. Ameglio, and P.A.K. Khan, *The Ghalilah SWRO plant: an overview of the solutions adopted to minimize energy consumption.* Desalination, 2005. **184**: p. 217-221.
234. SYCHEM, S.A., *Private Communication.* 2007.
235. Talaat, H.A. and S.R. Ahmed, *Treatment of agricultural drainage water: technological schemes and financial indicators.* Desalination, 2007. **204**: p. 102-112.
236. Ternero, V.R., L.G. Rodriguez, and C.G. Camacho, *Exergy analysis of a seawater reverse osmosis plant.* Desalination, 2005. **175**: p. 197-207.
237. Ternero, V.R., L.G. Rodriguez, and C.G. Camacho, *Thermoeconomic analysis of a seawater reverse osmosis plant.* Desalination, 2005. **181**: p. 43-59.
238. Thomson, M. and D. Infield, *A photovoltaic-powered seawater reverse osmosis system without batteries.* Desalination, 2002. **153**: p. 1-8.
239. Thomson, M. and D. Infield, *Laboratory demonstration of a photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries.* Desalination, 2005. **183**: p. 105-111.
240. Thomson, M., M.S. Miranda, and D. Infield, *A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range.* Desalination, 2002. **153**: p. 229-236.

241. Tian, J., et al., *Economic analyses of a nuclear desalination system using deep pool reactors.* Desalination, 1999. **123**: p. 25-31.
242. Tian, L., et al., *A historical opportunity: economic competitiveness of seawater desalination project between nuclear and fossil fuel while the world oil price over $50 per boe - part A: MSF.* Desalination, 2005. **183**: p. 317-325.
243. Tian, L., Y. Tang, and Y. Wang, *Economic evaluation of seawater desalination for a nuclear heating reactor with multi-effect distillation.* Desalination, 2005. **180**: p. 53-61.
244. Tian, L., Y. Wang, and J. Guo, *Economic analysis of a 2x200MW nuclear heating reactor for seawater desalination by multi-effect distillation (MED).* Desalination, 2002. **152**: p. 223-228.
245. Trieb, F., et al., *Combined solar power and desalination plants for the Mediterranean region - sustainable energy supply using large-scale solar thermal power plants.* Desalination, 2002. **153**: p. 39-46.
246. Tsiakis, P. and L.G. Papageorgiou, *Optimal design of an electrodialysis brackish water desalination plant.* Desalination, 2004. **173**: p. 173-186.
247. Tsiourtis, N.X., *Desalination and the environment.* Desalination, 2001. **141**: p. 223-236.
248. Tsiourtis, N.X., *Seawater desalination projects. The Cyprus experience.* Desalination, 2001. **139**: p. 139-147.
249. Tsoutsos, T., V. Gekas, and K. Marketaki, *Technical and economical evaluation of solar thermal power generation.* Renewable energy, 2003. **28**: p. 873-886.
250. Tsoutsos, T., et al., *Supporting schemes for renewable energy sources and their impact on reducing the emissions of greenhouse gases in Greece.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**: p. 1767-1788.

251. Turek, M., *Seawater desalination and salt production in a hybrid membrane-thermal process.* Desalination, 2002. **153**: p. 173-177.
252. Turek, M. and P. Dydo, *Hybrid membrane-thermal versus simple membrane systems.* Desalination, 2003. **157**: p. 51-56.
253. Turek, M., P.Dydo, and R. Klimek, *Salt production from coal-mine brine in ED-evaporation-crystallization system.* Desalination, 2005. **184**: p. 439-446.
254. Tzen, E. *Renewable energy sources for desalination.* in *Workshop on Desalination Units Powered by RES.* 2006. Athens.
255. Tzen, E. and R. Morris, *Renewable energy sources for desalination.* Solar energy, 2003. **75**: p. 375-379.
256. Uche, J., L. Serra, and A. Valero, *Hybrid desalting systems for avoiding water shortage in Spain.* Desalination, 2001. **138**: p. 329-334.
257. UNFCCC, *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* 1998, UNITED NATIONS.
258. Varian, H.R., *How to Build an Economic Model in Your Spare Time.* UC Berkeley, 1997.
259. Vince, F., et al., *LCA tool for the environmental evaluation of potable water production.* Desalination, 2008. **220**: p. 37-56.
260. Vince, F., et al., *Multi-objective optimization of RO desalination plants.* Desalination, 2008. **222**: p. 96-118.
261. Vlachos, G.T. and J.K. Kaldellis, *Application of gas-turbine exhaust gases for brackish water desalinarion: a techno-economic evaluation.* applied thermal engineering, 2004. **24**: p. 2487-2500.
262. Voivontas, D., et al., *Water supply modeling towards sustainable environmental management in small islands: the case of Paros, Greece.* Desalination, 2003. **156**: p. 127-135.

263. Voivontas, D., D. Assimacopoulos, and A. Mourelatos, *Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system.* Renewable energy, 1998. **13**(3): p. 333-344.
264. Voivontas, D., et al., *A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies.* Desalination, 2001. **133**: p. 175-198.
265. Voivontas, D., G. Tsiligiridis, and D. Assimacopoulos, *Solar potential for water heating explored by GIS.* Solar energy, 1998. **62**(2): p. 419-427.
266. Voivontas, D., et al., *Market potential of renewable energy powered desalination systems in Greece.* Desalination, 1999. **121**: p. 159-172.
267. Wade, N.M., *Distillation plant development and cost update.* Desalination, 2001. **136**: p. 3-12.
268. Walha, K., et al., *Brackish groundwater treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electrodialysis in Tunisia: performance and cost comparison.* Desalination, 2007. **207**: p. 95-106.
269. Wang, H. and T. Nakata, *Analysis of the market penetration of clean coal technologies and its impacts in China's electricity sector.* Energy Policy, 2009. **37**: p. 338-351.
270. Ward, J., *A plastic solar water purifier with high output.* Solar energy, 2003. **75**: p. 433-437.
271. Wheida, E. and R. Verhoeven, *The role of "virtual water" in the water resources management of the Libyan Jamahiriya.* Desalination, 2007. **205**: p. 312-316.
272. Wilf, M. and C. Bartels, *Optimization of seawater RO systems design.* Desalination, 2005. **173**: p. 1-12.
273. WindCad, *Bergey Windpower Co. available online.* 2000.
274. Withers, A., *Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants.* Desalination, 2005: p. 11-24.

275. Wu, S., *Analysis of water production costs of a nuclear desalination plant with a nuclear heating reactor coupled with MED processes.* Desalination, 2006. **190**: p. 287-294.
276. Wu, S. and Z. Zhang, *An approach to improve the economy of desalination plants with a nuclear heating reactor by coupling with hybrid technologies.* Desalination, 2003. **155**: p. 179-185.
277. WWF, *MAKING WATER - Desalination: option or distraction for a thirsty world?* 2007.
278. Yanniotis, S. and K. Xerodemas, *Air humidification for seawater desalination.* Desalination, 2003. **158**: p. 313-319.
279. Yuan, G. and H. Zhang, *Mathematical modeling of a closed circulation solar desalination unit with humidification-dehumidification.* Desalination, 2007. **205**: p. 156-162.
280. Zejli, D., et al., *Economic analysis of wind-powered desalination in the south of Morocco.* Desalination, 2004. **165**: p. 219-230.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Η μέθοδος της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA)

Σύνοψη

Η LCA (Life Cycle Assessment) είναι μια τυποποιημένη μέθοδος η οποία επιτρέπει την ολοκληρωμένη καταγραφή, ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών βλαβών που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διαδικασία ή μια υπηρεσία στο πλαίσιο μιας δεδομένης αναζήτησης. Η ολοκληρωμένη επισκόπιση περιλαμβάνει όλα τα σταδία που προηγούνται και ακολουθούν μια διαδικασία (Striegel, 2000). Η δομή της LCA περιγράφεται με τους κανονισμούς DIN/ISO 14040. Αρχικά ορίζεται ο αντικειμενικός σκοπός και το πλαίσιο της εκτίμησης. Στο δεύτερο στάδιο αναλύεται η απογραφή. Στο σημείο αυτό με βάση ορισμένους κανόνες καταγράφονται οι ροές υλικού και ενέργειας των σχετικών σταδίων διεργασίας σε σχέση με μια ποσότητα που σχετίζεται με το κέρδος (μονάδα κέρδους). Σε ένα τρίτο στάδιο μετά την ολοκλήρωση του τεκμηριωμένου ισοζύγιου μπορεί να αρχίσει η εκτίμηση των επιπτώσεων. Η εκτίμηση αυτή αφορά την ταυτοποίηση, άθροιση και ποσοτικοποίηση των δυνητικών περιβαλλοντικών συνεπειών των εξεταζόμενων συστημάτων και παρέχει στοιχειώδεις πληροφορίες για την ερμηνεία που ακολουθεί στο τέταρτο στάδιο. Κατά την εξαγωγή των συμπερασμάτων, ανεξάρτητα από τα καθαρά αποτελέσματα, μπορούν να ληφθούν υπόψιν και προτάσεις για ενέργειες και αποφάσεις σε σχέση με το ερώτημα. Το ίδιο ισχύει και για ατομικά στοιχεία όπως ηθικά θέματα, τεχνική επιτευξιμότητα καθώς επίσης και πολιτικοκοινωνικά και οικονομικά θέματα.

Τα βασικά

Η επιστημονική μέθοδος της εκτίμησης κύκλου ζωής επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών βλαβών που προκαλούνται από

προϊόντα, διαδικασίες και υπηρεσίες. «Κατά την Γερμανική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Περιβάλλοντος χρησιμεύει για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών συνεπειών για δύο ή μερικά διαφορετικά προϊόντα, για ομάδες προϊόντων, συστημάτων, διαδικασιών ή συμπεριφορών, και βοηθά στην αποκάλυψη των ασθενών σημείων, στην βελτίωση των προϊόντων, των περιβαλλοντικών ιδιοτήτων, στην σύγκριση των εναλλακτικών προτύπων συμπεριφοράς και τους λόγους για συστάσεις δράσεων». (German Federal Environment Agency, 1992). Αρχικά το όργανο της LCA αναπτύχθηκε με στόχο την επίτευξη της μέγιστης ποσοτικοποίησης της συνολικής ζωής ενός προϊόντος. Το πρώτο συγκριτικό σύστημα αναλύσεων προϊόντων –αφορούσε τις συσκευασίες αναψυκτικών – άρχισε ήδη γύρω στα 1970 στις ΗΠΑ και την Γερμανία. Ωστόσο ακόμη και τότε θέματα όπως ακατέργαστα υλικά, ενεργειακές απαιτήσεις, εκπομπές και αποκομιδή αποβλήτων ήταν σημαντικά και συνεπώς εστιασμένα σε ένα ολοκληρωμένο ισοζύγιο. Εκείνη την εποχή είχαν ήδη γίνει τα τα πρώτα βήματα αξιολόγησης καθορισμένων ροών υλικών σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνέπειες. Εν τούτοις η σημαντικότητά τους δεν αναπτύχθηκε περαιτέρω πριν την δεκαετία του 1980 (German Federal Environment Agency, 1996). Μετά από βελτιώσεις χρόνων, από το 1997 είναι διαθέσιμο ένα αναγνωρισμένο μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας (ISO/EN/DIN 14040, 1997). Εν τω μεταξύ με εντατικές προσπάθειες για διεθνείς τυποποιήσεις (ISO/EN/DIN 14041, 1998) μπόρεσαν να γίνουν συμφωνίες που αφορούσαν σαφείς ορισμούς των επιμέρους θεμάτων δηλ. του ορισμού του σκοπού και της εμβέλειας του ισοζυγίου καθώς επίσης και την απογραφική ανάλυση. Άλλα θέματα όπως της εκτίμησης των επιπτώσεων (ISO/EN/DIN 14042, 2000) ή της αξιολόγησης (ISO/EN/DIS 14043, 2000) είναι ακόμη στα στάδιο των συζητήσεων.

Η μέθοδος LCA μπορεί κατ' αρχήν να χρησιμοποιηθεί όχι μόνον για προϊόντα αλλά και για τεχνικές διαδικασίες (Burgess and Brennan, 2001, Curran, M.A. 2000. Τα τμήματα της LCA περιγράφονται στη συνέχεια.

Προηγουμένως πριν από την ολοκληρωμένη επισκόπιση της μεθόδου εκτίθεται σύντομα η βασική της ιδέα.

Ολοκληρωμένη θεώρηση

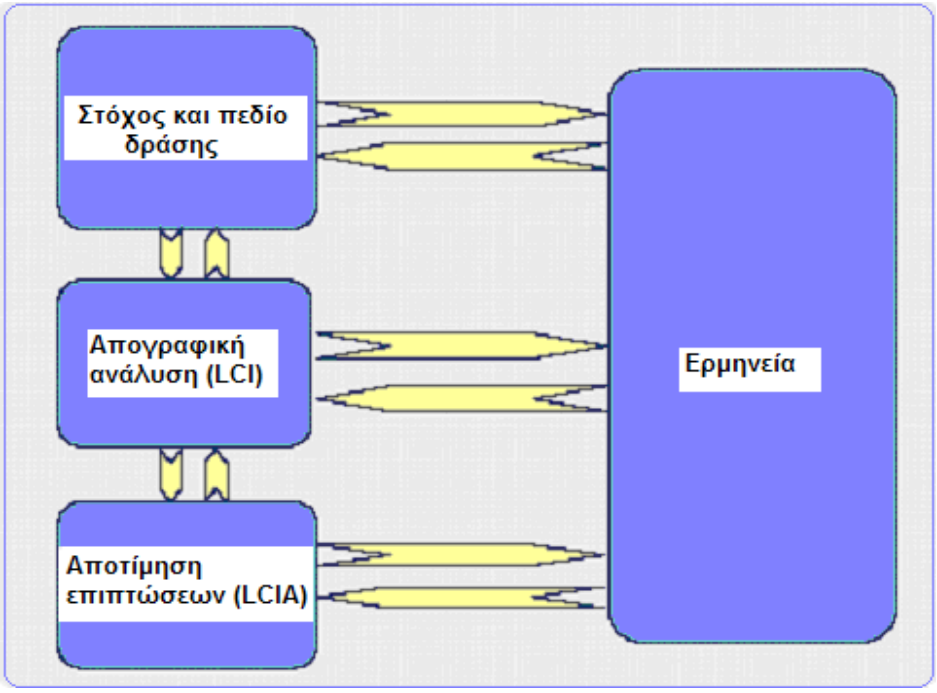
Η βασική έννοια της εκτίμησης κύκλου ζωής είναι η καταγραφή όλων των ρευμάτων υλικού και ενέργειας που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διαδικασία ή μια υπηρεσία. Η πλήρης ζωή των προϊόντων ή του συστήματος προϊόντων εξετάζεται από «το λίκνο μέχρι τον τάφο». Αυτό σημαίνει ότι καταγράφονται όχι μόνον οι περιβαλλοντικές συνέπειες από τον σχεδιασμό της παραγωγής αλλά επίσης η πλήρης βιομηχανοποίηση του προϊόντος από την βιομηχανική εκμετάλευση των ακατέργαστων υλικών πέρα από την διανομή, τη χρήση και κατανάλωση συμπεριλαμβανομένης της χρήσης και αποκομιδής. Αυτή η εκτεταμένη προσέγγιση είναι σημαντική γιατί οι αναφορές για πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προϊόντων ή των διαδικασιών μπορεί να διαφοροποιηθούν εάν η θεώρηση είναι ιδιαίτερα στενή.

Η Μέθοδος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η δομή και οι απαιτήσεις της LCA είναι καθορισμένες στον κανονισμό προτύπων DIN/ISO 14040–14043. Σύμφωνα με τα πρότυπα αυτά η LCA χωρίζεται σε τέσσερα μέρη:

- Καθορισμός του σκοπού και του πεδίου δράσης
- Απογραφική ανάλυση
- Εκτίμηση επιπτώσεων
- Ερμηνεία.

Ακολούθως τα τέσσερα αυτά μέρη συζητούνται λεπτομερώς.



Εικόνα 1: Συνιστώσες μιας LCA

Ορισμός του σκοπού και του πεδίου δράσης

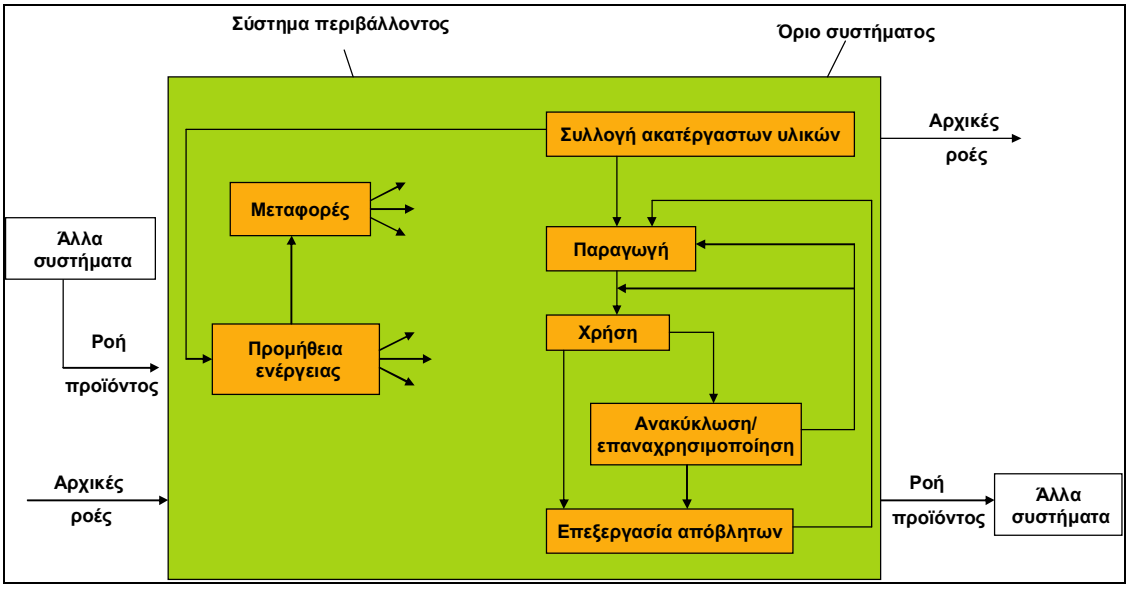
Ο καθορισμός του στόχου και του πεδίου δράσης της LCA είναι αποφασιστικός επειδή αποτελεί τη φάση των ουσιωδών προσδιορισμών. Σύμφωνα με τους σκοπούς και τα ενδιαφέροντα της μελέτης οριοθετείται το πλαίσιο εργασίας για την επισκόπιση και καθορίζονται οι απαιτήσεις για τις επόμενες φάσεις της μελέτης. Αυτό μπορεί να αφορά το βάθος της επισκόπισης, την απαιτούμενη ποιότητα των δεδομένων, την συλλογή των αποτελεσματικών παραμέτρων σε σχέση με την εκτίμηση των επιπτώσεων και τις ερμηνευτικές δυνατότητες στο πλαίσιο εργασίας της αξιολόγησης. Ο επαναληπτικός χαρακτήρας της LCA καταλήγει σε επανατροφοδότηση. Πρέπει επίσης να αποφασιστεί κατά πόσον και πώς ένα εξωτερικό κείμενο αξιολόγησης (κριτική επισκόπιση) πρέπει να συνταχθεί από μια επιτροπή ειδικών όπως απαιτεί ο κανονισμός ISO 14040 για συγκριτικές μελέτες που προορίζονται για το κοινό.

Ορισμός του στόχου

Κατά την πορεία του καθορισμού του αντικειμενικού στόχου πρέπει να παγιωθούν οι σταθεροί στόχοι και το απώτερο ενδιαφέρον της LCA. Πέραν τούτου πρέπει να καθοριστούν οι αποδέκτες (πελάτες) και οι ομάδες στόχοι. Εάν είναι ανάγκη πρέπει να επισημανθεί ποιό ρόλο παίζει η LCA στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και εάν αυτό συνδέεται με επιπλέον ανασκοπίσεις (για παράδειγμα για οικονομικά, τεχνολογικά και κοινωνικά ζητήματα). Με την μετάδοση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνει σαφές ποιές ερωτήσεις είναι κατάλληλες για την LCA και για ποιές όχι.

Καθορισμός των ορίων του συστήματος

Τα όρια του συστήματος πρέπει να οριστούν σύμφωνα με τους καθορισμένους στόχους της LCA. Πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα διαθέσιμα μέσα, το χρονικό πλαίσιο και η διαθεσιμότητα των αναγκαίων δεδομένων. Ειδικότερα, πρέπει να καθοριστούν, το χρονικό πλαίσιο, ο χώρος, η πραγματική και η τεχνική πορεία καταγραφής, δηλαδή η έκταση και η κλίμακα του ισοζυγίου. Το όριο του συστήματος σηματοδοτεί την αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος και άλλων συστημάτων. Ορίζει επίσης ποιές διαδικασίες περιλαμβάνονται ή αποκλείονται από την επισκόπιση. Σε σχέση με την πρόσκτηση των δεδομένων πρέπει να καθοριστεί η κλίμακα, ο τύπος (ειδικός, μέσος), και η ποιότητα των αναγκαίων δεδομένων.



Εικόνα 2: Ιδεατή παρουσίαση ενός συστήματος παραγωγής για εκτίμηση του κύκλου ζωής

Οφέλη και λειτουργική μονάδα

Τα οφέλη (ή οι λειτουργίες) των εξεταζόμενων παραγωγικών συστημάτων θα πρέπει να προσδιορίζονται ξεκάθαρα. Για την ποσοτικοποίηση ενός δεδομένου οφέλους, θα πρέπει να οριστεί μία λειτουργική μονάδα (όπως π.χ. ένας τόνος προϊόντος), η οποία θα χρησιμοποιείται σαν μονάδα αναφοράς για όλα τα ρεύματα εισροής και εκροής, όπως επίσης και για τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Όταν συγκρίνονται διαφορετικά προϊόντα ή διαδικασίες, είναι πολύ σημαντικό το κριτήριο της λειτουργικής ισοδυναμίας να μπορεί να εφαρμοστεί στα εξεταζόμενα συστήματα. Μόνο λειτουργικά ισοδύναμα συστήματα μπορούν να συγκριθούν. Διαφορές στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εναλλακτικών συστημάτων μπορούν να αποδοθούν άμεσα στα προϊόντα ή τις διεργασίες μόνο αν η λειτουργία των εξεταζόμενων συστημάτων είναι ισοδύναμη.

Ανάλυση απογραφών

Στην φάση της ανάλυσης απογραφών, μετρώνται οι τιμές των ροών υλικών και ενέργειας και καταγράφονται καθ'όλη την διάρκεια ζωής τους. Σε ένα πρώτο στάδιο, οι δομές των διεργασιών μοντελοποιούνται έτσι ώστε να υπάρχει μία βάση για την οργάνωση των δεδομένων. Οι ροές υλικών και ενέργειας προσδιορίζονται ως μεγέθη εισόδου-εξόδου για όλες τις επιμέρους διεργασίες που περικλείονται από τα όρια του συστήματος. Συνδέοντας τις επιμέρους διεργασίες μεταξύ τους, αναπαριστώνται οι σχέσεις ανάμεσα στις υπομονάδες και το περιβάλλον, το δε ισοζύγιο μάζας/ενέργειας αποτελεί την απογραφή του ολικού συστήματος. Όλα τα ρεύματα ροής ενέργειας και υλικών που διέρχονται από το σύστημα καταγράφονται σαν ποσότητες σε φυσικές μονάδες. Τα δεδομένα αναφέρονται στην λειτουργική μονάδα.

Εκτίμηση επιπτώσεων

Το έργο της εκτίμησης επιπτώσεων είναι ο συσχετισμός των ρευμάτων υλικού και ενέργειας τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση απογραφών με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό η εκτίμηση επιπτώσεων περιλαμβάνει την αναγνώριση, σύνοψη και ποσοτικοποίηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εξεταζόμενων συστημάτων. Παρακάτω αναπτύσσονται τα επιμέρους βήματα της ανάλυσης επιπτώσεων, όπως ο ορισμός των κατηγοριών, η ταξινόμηση και ο χαρακτηρισμός των επιπτώσεων. Στο πλαίσιο της «ταξινόμησης» οι ροές ενέργειας και υλικών που εξετάστηκαν στην ανάλυση απογραφών αξιολογούνται ως προς περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν καθοριστεί προηγουμένως.

Οι παρακάτω κατηγορίες επιπτώσεων περιλαμβάνονται συνήθως σε μία εκτίμηση κύκλου ζωής:

-Παγκόσμια υπερθέρμανση

-Στρατοσφαιρική καταστροφή όζοντος

-(Τροποσφαιρική) φωτοχημική δημιουργία όζοντος
-Οξίνιση
-Ευτροφισμός
-Τοξικότητα στον άνθρωπο
-Οικοτοξικότητα
-Χρήση γης.

Οι κατηγορίες επιπτώσεων περιλαμβάνουν πιθανές επιδράσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ανάμεσα σε άλλα, διαφέρουν ανάλογα και με τις χωρικές αναφορές τους (παγκόσμιες, περιφερειακές, τοπικές). Βασικά, η οποιαδήποτε περιβαλλοντική επίπτωση μπορεί να συμπεριληφθεί στην έρευνα, αν είναι διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα, όπως επίσης και ενα κατάλληλο μοντέλο για την περιγραφή και παραμετροποίηση της επίπτωσης. Μία ροή υλικού μπορεί να ευθύνεται για πολλαπλές περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στο στάδιο του χαρακτηρισμού, λαμβάνει χώρα ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων που έχουν αποδοθεί στα ρεύματα ροής. Με την βοήθεια παραγόντων ισοδυναμίας, οι διαφορετικές συνεισφορές των υλικών συσχετίζονται με μία περιβαλλοντική επίδραση που ορίζεται, σύμφωνα με κάποια ουσία αναφοράς. Οι ροές που έχουν καταγραφεί στην φάση της ανάλυσης απογραφών πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους παράγοντες ισοδυναμίας και αθροίζονται οι επιμέρους συνεισφορές. Το δυναμικό της επίδρασης που προσδιορίζεται αποτελεί ένα μέτρο της πιθανής περιβαλλοντικής βλάβης. Οι ποσότητες των διαφορετικών δυναμικών επίδρασης δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες η μία με την άλλη. Στην φάση της «τυποποίησης», το αποτέλεσμα ενός προσδιορισθέντος δυναμικού επίδρασης συσχετίζεται με μια χωρική τιμή. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι δεν μπορούν να συσσωρεύονται πολλές κατηγορίες επιδράσεων σε έναν ή περισσότερους δείκτες. Η απαραίτητη αξιολόγηση γίνεται συνήθως με βάση εξατομικευμένα κριτήρια, τα οποία δεν είναι πάντα αποδεκτά από επιστημονική άποψη.

Ερμηνεία

Το έργο της ερμηνείας συνίσταται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων όπως επίσης και στην αξιολογήση της σημασίας τους και των περιορισμών που μπορεί να έχουν αυτά. Τα ουσιαστικά γεγονότα, βασισμένα στα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφών και της εκτίμησης επιπτώσεων πρέπει να οριοθετηθούν και να ελεγχθούν ως προς την πληρότητα, την ευαισθησία και την συνέπεια των αποτελεσμάτων. Οι παραδοχές που έχουν γίνει στην φάση ορισμού του στόχου και του σκοπού θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν. Με βάση αυτά, θα πρέπει να εξαχθούν συμπεράσματα και να γίνουν συστάσεις.

Βιβλιογραφία

Striegel, G. (2000). *Entwicklung von Methodenbausteinen für die Ökobilanzierung technischer Verfahren am Beispiel von zwei Fallstudien.* Dissertation, Friedrich- Schiller-Universität Jena, Institut für Technische Chemie und Umweltchemie, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät.

Umweltbundesamt. (1992). Ökobilanzen für Produkte, Bedeutung Sachstand–Persepektiven. Berlin: Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt. (1995). Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Berlin: Umweltbundesamt.

ISO/EN/DIN 14040. (1997). Umweltmanagement, Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine
Anforderungen.

ISO/EN/DIN 14041. (1998). Umweltmanagement, Produkt-Ökobilanz, Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz.

ISO/EN/DIN 14042. (2000). Umweltmanagement, Ökobilanz, Wirkungsabschätzung.

ISO/EN/DIS 14043. (2000). Umweltmanagement, Ökobilanz, Auswertung.

Burgess, A.A. und Brennan, D.J. (2001). Application of life cycle assessment to chemical
processes. *Chemical Engineering Science*, 56(2001), 2589-2604.

Curran, M.A. (2000). Life Cycle Assessment: An International Experience. *Environmental Progress*, 19(2), 65-71.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC): Guidelines for Life-Cycle Assessment, A "Code of Practice"; SETAC Workshop in Sesimbra 31.03.-03.04.1993, Brüssel, 1993